

Федеральное государственное автономное образовательное учреждение
высшего образования «Уральский федеральный университет имени первого
Президента России Б.Н. Ельцина»
Институт новых материалов и технологий
Кафедра металлургических и роторных машин

На правах рукописи



БУЛГАНИНА МАРИНА ЮРЬЕВНА

**ИССЛЕДОВАНИЕ И СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ ТЕХНОЛОГИИ
ОБКАТКИ ТРУБ НА ТРУБОПРОКАТНОМ АГРЕГАТЕ
С АВТОМАТСТАНОМ**

Специальность 2.5.7. Технологии и машины обработки давлением

ДИССЕРТАЦИЯ
на соискание учёной степени
кандидата технических наук

Научный руководитель:
доктор технических наук, доцент
Раскатов Евгений Юрьевич

Екатеринбург – 2023

ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ	4
ГЛАВА 1. ОБЗОР СОВРЕМЕННОГО УРОВНЯ ПРОИЗВОДСТВА И ТЕОРЕТИЧЕСКИХ ИССЛЕДОВАНИЙ ГОРЯЧЕДЕФОРМИРУЕМЫХ ТРУБ	11
1.1. Способы производства заготовок для горячекатаных труб.....	11
1.2. Способы производства горячекатаных труб	13
1.3. Технология производства труб на трубопрокатном агрегате с автоматстаном	15
1.4. Механические свойства сталей различных групп прочности	18
1.5. Обзор дефектов, возникающих при производстве горячекатаных труб.....	20
1.6. Применение поперечно-винтовой раскатки труб в установках с автоматическим станом.....	23
1.7. Описание очага деформации в процессе поперечно-винтовой прокатки	25
1.8. Теоретические исследования процесса поперечно-винтовой прокатки полых заготовок.....	29
1.9. Постановка задачи исследования	35
1.10. Выводы по главе 1.....	36
ГЛАВА 2. МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА ПОПЕРЕЧНО-ВИНТОВОЙ ПРОКАТКИ НА ОБКАТНЫХ СТАНАХ ТРУБОПРОКАТНЫХ УСТАНОВОК	37
2.1. Выбор метода теоретического исследования.....	37
2.2. Обоснование расчётной схемы процесса поперечно-винтовой прокатки труб на обкатных станах.....	41
2.3. Определение параметров граничных условий процесса поперечно-винтовой прокатки труб.....	44
2.4. Выводы по главе 2.....	52

ГЛАВА 3. ПАРАМЕТРИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ ПРОЦЕССА ПОПЕРЕЧНО-ВИНТОВОЙ ПРОКАТКИ ТРУБ НА ОБКАТНЫХ СТАНАХ	53
3.1. Алгоритм решения задачи определения параметров НДС очага деформации поперечно-винтовой прокатки при обкатке горячедеформированных труб в агрегате ТПА	53
3.2. Исходные данные для расчётной схемы и диапазон изменения параметров	57
3.3. Результаты параметрического анализа процесса обкатки горячедеформированных труб	63
3.3.1. Анализ основных стадий процесса обкатки	66
3.3.2. Анализ энергосиловых параметров процесса обкатки в зависимости от профиля трубы	73
3.3.3. Оценка энергосиловых параметров процесса обкатки в зависимости от типоразмера труб	84
3.3.4. Оценка необходимого усилия подачи при обкатке	96
3.4. Выводы по главе 3	96
ГЛАВА 4. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ЭНЕРГОСИЛОВЫХ ПАРАМЕТРОВ ЛИНИИ ПРИВОДА ОБКАТНОГО СТАНА	98
4.1. Объект, методика и программа экспериментального исследования	98
4.2. Обработка экспериментальных данных исследования	104
4.3. Проверка адекватности данных математической модели	121
4.4. Выводы по главе 4	153
ЗАКЛЮЧЕНИЕ	154
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ	156

ВВЕДЕНИЕ

Современная металлургия достигла больших успехов в повышении производительности и качества металлопродукции благодаря широкому применению бездоменного производства железа, внепечной обработки стали, непрерывной разливки металла, уменьшению доли холодной деформации в цикле пластической обработки. В то же время бурное развитие машиностроения, усложнение и расширение технологических возможностей оборудования, быстрое моральное устаревание диктуют требования расширения номенклатуры и существенного повышения качества прокатываемых труб, обеспечения специальных физико-механических свойств.

Особое значение расширение производства труб из сталей с повышенными показателями прочности имеет для нефтегазовой промышленности, являющейся одним из основных потребителей горячекатаных труб. Интенсификация процессов добычи энергоносителей на старых месторождениях, а также освоение новых, располагающихся в сложных климатических условиях, требует применения как новых марок сталей, так и традиционных марок, но с улучшенными свойствами за счёт применения современных методов термомеханической обработки. Это позволяет применять данный вид продукции трубопрокатного производства в условиях повышенных давлений, воздействия агрессивных сред, в арктических условиях.

Но, одновременно, освоение производства труб с более высоким уровнем механических свойств обуславливает рост технологических нагрузок при выпуске труб. Отсутствие научно обоснованных режимов деформации для ряда трубопрокатных агрегатов может приводить, с одной стороны к аварийным отказам оборудования, а с другой – к выпуску некондиционной продукции или снижению выхода годного.

Актуальность и степень разработанности темы исследования.

В настоящей работе решается проблема выпуска современной высокотехнологичной продукции, а именно труб нефтегазового назначения из

сталей повышенных групп прочности, при условии обеспечения работоспособности основного технологического оборудования трубопрокатного производства за счёт научно обоснованного совершенствования техники и технологии прокатки труб на трубопрокатных агрегатах с автоматическим станом и обкатными машинами. В работе решаются проблемы энергосбережения, снижения металлоёмкости оборудования, переналаживаемости и управляемости расширения номенклатуры выпуска и снижения отходов при прокатке черновой трубы для трубопрокатного комплекса с автоматстаном за счёт совершенствования техники и технологии прокатки и обкатки труб.

Применение исследуемой технологии, например, для производства труб из стали повышенной прочности даёт возможность повышения качества металлопродукции за счёт снижения количества брака, снижения влияния дефектов на концевых участках труб на энергосиловые параметры процесса и выход годного металла, а также уменьшает простои оборудования и тем самым повышает технико-экономические показатели работы трубопрокатного агрегата в целом.

Процесс обкатки бесшовных труб на трубопрокатном агрегате с автоматстаном является дискретным и имеет ряд существенных особенностей, отличающих его от сравнительно глубоко теоретически и экспериментально изученных процессов поперечно-винтовой прокатки. В развитие теории поперечно-винтовой прокатки большой вклад внесли такие отечественные учёные как П.Т. Емельяненко, А.П. Чекмарев, Ю.М. Матвеев, В.Н. Выдрин, П.К. Тетерин, Я.Л. Ваткин, Р.М. Голубчик, Б.А. Романцев, А.В. Курятников, А.А. Богатов, Е.И. Шифрин, Д.В. Овчинников, И.И. Лубе, А.Л. Марченко [1-15] и др.

Говоря о ценности известных работ, следует, однако, отметить, что некоторые положения теории поперечно-винтовой прокатки требуют уточнения, дальнейшего развития и экспериментальной проверки. Не все особенности процесса достаточно изучены, что затрудняет теоретическое обоснование технологических параметров. Не разработана методика анализа точности и

качества труб при обкатке. Неизвестно решение задачи об объёмном формоизменении при обкатке труб после автоматстана. Всё отмеченное выше определяет актуальность проведённого автором исследования.

Цель работы: совершенствование технологии обкатки труб и разработка на основе теоретических и экспериментальных исследований процесса поперечно-винтовой раскатки черновой трубы рекомендаций по назначению режимов деформации и использованию дополнительной валковой оснастки как для автомат-стана, так и для обкатных машин, а также создание научных предпосылок для эффективного использования трубопрокатных агрегатов с автоматическим станом.

Задачи исследования:

1. Разработать трёхмерную модель процесса поперечно-винтовой обкатки бесшовных труб в двухвалковой клетки на конической оправке на основе метода конечных элементов и выполнить многофакторное моделирование в программном комплексе DEFORM-3D.

2. Получить закономерности для энергосиловых параметров процесса для случаев установившегося течения процесса и при попадании в очаг деформации нового типа продольных дефектов на заднем конце трубы.

3. Выполнить экспериментальное исследование по определению реального уровня нагрузок в рабочей линии обкатного стана на существующей трубопрокатной установке ТПА-220 цеха №1 ПАО «ПНТЗ»

4. Осуществить согласование результатов теоретического и экспериментального исследования процесса поперечно-винтовой обкатки бесшовных труб и вывести обобщённые зависимости энергосиловых параметров для оценки уровня нагруженности рабочей клетки и линии привода обкатного стана для произвольного сортамента труб.

5. На основании исследования выдать рекомендации о возможности расширения сортамента прокатываемых труб по группам прочности материалов и максимальным размерам по оценке предельных нагрузок для узлов рабочей клетки.

Научная новизна и теоретическая значимость работы:

1. Впервые экспериментально и теоретически проанализирован технологический процесс обкатки труб после раскатки на автоматическом стане на обкатных машинах.

2. Выполнено экспериментальное и теоретическое описание процесса попадания новых видов продольных дефектов на трубах для ряда типовых маршрутов прокатки в калибр обкатных машин трубопрокатной установки. Выполнен анализ влияния данных дефектов на ход течения прокатки, оценка энергосиловых параметров процесса.

3. Разработана конечно-элементная модель поперечно-винтовой прокатки труб на конической оправке, согласованная с результатами моделирования деформации на автоматстане и методика вычислительного спланированного эксперимента на базе этой модели.

4. Предложены методики расчёта основных технологических параметров процесса обкатки в зависимости от основных входных факторов, характеризующих геометрию и движение технологического инструмента, настройку клетки обкатного стана, параметры исходных заготовок и получаемого полуфабриката.

5. По созданной методике вычислительного эксперимента проведён параметрический анализ влияния различных факторов на технологические нагрузки при осуществлении процесса обкатки.

6. Даны оценки температурного режима деформации труб при обкатке и на основе этого определены значения сопротивления металла горячей деформации в диапазоне применяемых при обкатке труб степеней и скоростей деформации.

7. Разработанная математическая модель обкатки труб позволяет широко варьировать начальные и граничные условия задачи, включая геометрию исходной заготовки с выделением зон дефектообразования, полями распределения напряжений, деформаций и температур, учитывать упругопластический характер материала заготовки, различные типы

контактного взаимодействия заготовки с прокатным инструментом и окружающей средой.

8. Конечно-элементная модель обкатки труб в объёмной постановке, совмещающая различный характер перемещения прокатного инструмента с интерпретацией результатов, полученных для моделирования тонкостенных труб при раскатке в клетки автоматического стана и методика вычислительного спланированного эксперимента на базе этой модели.

Практическая значимость работы:

1. Получены новые данные по энергосиловым параметрам процесса, взаимному влиянию параметров на ход течения процесса обкатки труб при наличии и отсутствии продольных концевых дефектов.

2. На основании результатов экспериментального и теоретического исследования сформулированы рекомендации о возможности производства труб расширенного сортамента из сталей повышенных групп прочности.

3. Разработанная оригинальная методика экспериментальных исследований и созданное для этого программное обеспечение позволяет использовать данные мониторинга в производственных условиях токовых и скоростных параметров главных приводов для контроля уровня технологических нагрузок при обкатке труб.

В качестве объекта исследования был рассмотрен обкатной стан трубопрокатной установки с автоматстаном ПАО «Первоуральский новотрубный завод».

Методология и методы исследования. При выполнении работы использовались методы математического моделирования, статистической обработки результатов экспериментов и физическое моделирование процесса обкатки.

Положения, выносимые на защиту:

1. Математическое описание очага деформации процесса поперечно-винтовой прокатки бесшовных труб в двухвалковой клетки, выполненная в программном комплексе конечно-элементного моделирования, позволяющее

оценивать напряженно-деформированное состояние (НДС) с целью получения данных о геометрии заготовки до и после обработки и энергосиловых параметрах процесса.

2. Результаты расчёта полей НДС с определением компонентов тензоров напряжений, деформаций, скоростей деформации с целью получения зависимостей энергосиловых параметров в течение цикла обкатки.

3. Методика комплексной оценки рабочей линии привода обкатного стана для определения реального уровня нагрузок с учётом многообразия действующих факторов для большинства типоразмеров труб и оценки динамических процессов.

4. Аналитические зависимости энергосиловых параметров процесса поперечно-винтовой прокатки труб в двухвалковой клети от основных геометрических размеров готовой трубы, физико-механических свойств материала трубы и технологических настроек процесса.

Личный вклад автора состоит в постановке задачи исследования, разработке математической модели процесса поперечно-винтовой обкатки трубной заготовки на оправке, проведении расчётов с использованием математической модели, разработке методики экспериментального исследования с целью установления реального уровня нагружения и прогнозирования нагрузок при переходе на производство изделий из сплавов повышенной прочности, а так же верификации результатов теоретических исследований, формулировании выводов, рекомендаций по улучшению технологии ведения процесса обкатки труб, подготовке публикаций и докладов по тематике диссертации.

Степень достоверности и апробация результатов. Достоверность работы обусловлена наличием хорошей сходимости между результатами математического моделирования кинематических нагрузочных характеристик, параметров формоизменения при обкатке труб с результатами лабораторных экспериментов в производственных условиях. Для решения вариационных задач применяли программный комплекс конечно-элементного моделирования

DEFORM-3D, апробированный для расчёта технологических процессов обработки металлов давлением на многочисленных предприятиях, в институтах в России и мире. При анализе результатов вычислительных и лабораторных экспериментов использовались методы статистической обработки.

Основные результаты работы докладывались и обсуждались на научно-технических конференциях: Proceedings of the 16th International Conference on Industrial Manufacturing and Metallurgy, 2021, Proceedings of the III International Conference on Advanced Technologies in Materials Science, Mechanical and Automation Engineering, 2021; International Conference on Modern Trends in Manufacturing Technologies and Equipment 2020; 4th International Scientific and Technical Conference on Scientific and Technical Progress in Ferrous Metallurgy, 2019, 2020; International Conference on Modern Trends in Manufacturing Technologies and Equipment 2021,2020; 2nd International Conference on Modernization, Innovations, Progress: Advanced Technologies in Material Science, Mechanical and Automation Engineering, 2020 и на кафедре «Металлургические и роторные машины» УрФУ в 2022 г.

Публикации. По теме диссертации опубликовано 12 научных работ, в том числе 7 статей в изданиях, индексируемых в международных базах Web of Science и Scopus, 5 статей в российских изданиях и сборниках конференций.

Диссертационная работа состоит из введения, четырёх глав, заключения и списка литературы, включающего 105 источников, имеет 89 рисунков и 6 таблиц.

Автор выражает благодарности коллегам по работе к.т.н. Беляеву С.Ю., к.т.н. Федулову А.А. Автор приносит благодарность ПАО «Первоуральский новотрубный завод» в лице Моргунова В.А. за активную помощь при оснащении действующего оборудования специальной оснасткой и в организации проведения экспериментальных исследований в цеховых условиях.

Автор выражает благодарности научным консультантам д.т.н., профессору Чечулину Ю.Б., д.т.н., профессору Паршину В.С.

ГЛАВА 1. ОБЗОР СОВРЕМЕННОГО УРОВНЯ ПРОИЗВОДСТВА И ТЕОРЕТИЧЕСКИХ ИССЛЕДОВАНИЙ ГОРЯЧЕДЕФОРМИРУЕМЫХ ТРУБ

Бесшовные трубы применяются во всех отраслях промышленности: газовой, нефтяной, где они используются не только как продуктопроводные, но и для бурения и обсадки скважин, в машиностроении, где они используются для изготовления деталей, элементов машин и установок (котлы, крекинговые установки, двигатели внутреннего сгорания и др.), а также в оборонной промышленности.

Основными потребителями бесшовных труб являются те области промышленности, где по условиям эксплуатации основным материалом должны быть высокоуглеродистые, легированные и высоколегированные марки сталей.

В последние десятилетия замена бесшовных труб сварными замедлилась в связи с усложняющимися условиями эксплуатации труб, например низкими температурами, большими глубинами, высокими давлениями. В добываемых продуктах присутствуют агрессивные компоненты: сероводород, углекислый газ и хлориды – это потребовало использование толстостенных труб (с толщиной стенки более 15 мм) из высоколегированных специальных сплавов с высокими пределами прочности (до 1000 МПа), что ограничивает свариваемость материалов и снижает возможность использования сварных труб. Из этого можно сделать вывод, что возрождающаяся потребность в бесшовных трубах ставит задачу в производстве продукции повышенного качества с новым уровнем нагрузок на имеющиеся виды прокатного оборудования.

1.1. Способы производства заготовок для горячекатаных труб

Производство труб является одним из наиболее сложных и специфичных этапов общей технологической цепи получения металлопродукции, который определяет основные показатели качества готовых труб, используемых в качестве элементов ответственных конструкций. Специфика трубного передела

в том, что процесс деформации металла определяется несколькими последовательными операциями технологического цикла, каждая из которых характеризуется различными схемами напряженно-деформированного состояния.

В качестве заготовки для изготовления бесшовных труб применяют круглые или квадратные катаные, кованные и литые заготовки, поступающие в виде штанг, слитков или непрерывнолитых заготовок [18].

Несмотря на то, что отработанными являются технологии сифонной разливки и центробежной отливки полых заготовок, которые применяют в основном для изготовления труб из высоколегированных сталей, они включают механическую обточку наружной и внутренней поверхности перед дальнейшей пластической деформацией, что влечёт потери 10-15% толщины стенки.

Наиболее эффективно и экономически выгодно на сегодняшний день при производстве бесшовных труб использовать непрерывнолитые восьмигранные, круглые и квадратные заготовки. Этот способ производства заготовок получил наибольшее распространение, так как выход годного (по заготовке) в сравнении с разливкой в изложницы увеличивается на 10–12%. Непрерывнолитые заготовки изготавливают диаметром от 145 до 600 мм и длиной от 1,4 м до 12 м.

Катаные и кованные трубные заготовки производят из слитков массой 3-15 т. Основная задача предварительной обработки давлением литого металла – устранение типично литой структуры и измельчение всякого рода включений. В зависимости от типа прокатного стана и технологии прокатки применяют литые круглые заготовки диаметром 90 мм и выше и блюмы со стороной квадрата 350 мм и более [19].

Подготовка заготовки к прокатке заключается в раскroe на мерные длины, нагреве, центровке и прошивки сплошных заготовок в толстостенную гильзу [20, 21]. Раскрой заготовок на требуемые мерные длины может проводиться как перед нагревом заготовки в холодном состоянии, так и в горячем состоянии. В горячем состоянии разрезка заготовки проводится после нагрева в специальных многоканальных нагревательных печах.

Нагрев заготовок проводят в пламенных или электрических печах. Во всех видах нагревательных печей осуществляется методический нагрев: заготовки постепенно из зоны более низких температур поступают в зону более высоких температур.

Зацентровка заготовок преследует целью максимально совмещение носка оправки при прошивке с осью прошиваемой заготовки, что уменьшает разнотонность гильзы и, следовательно, разнотонность готовой трубы. На переднем конце заготовки наносится цилиндрическое углубление сверлением на токарном станке, выжиганием кислородно-ацетиленовым пламенем или выдавливанием отверстия на горячей заготовке пневматическими машинами или гидравлическим прессом.

Для получения полых заготовок (гильз) существует несколько способов: прошивка сплошных круглых заготовок на двухвалковых станах винтовой прокатки, прошивка сплошных круглых заготовок на трёхвалковых станах и прошивка сплошных заготовок на прессах.

1.2. Способы производства горячекатаных труб

Процесс производства горячедеформированных труб характеризуется способом получения черновой трубы (способом раскатки гильзы в трубу), в связи с чем трубопрокатные агрегаты получают соответствующее название по указанному способу. В практике находят применение трубопрокатные агрегаты с автоматическими, непрерывными, пилигримовыми, трёхвалковыми и планетарными раскатными станами винтовой прокатки и реечными станами.

Одним из наиболее распространенных способов раскатки гильз, полученных на прошивном стане, является продольная прокатка на автоматическом стане. Гильза прокатывается в черновую трубу в круглом калибре на неподвижной короткой оправке за два/три прохода. Раскатка осуществляется или в одной клети со сменой оправки между проходами на оправку большего диаметра и кантовкой трубы на 90° (ТПА с автоматическим станом) или прокаткой в двух последовательных клетях одинакового калибра с

кантовкой между клетями и оправкой на 1-2 мм большей во второй клетке, чем в предыдущей (ТПА со станом-тандем). На агрегатах с автоматстанами прокатывают трубы диаметром от 40 до 426 мм с толщиной стенки от 3 до 50 мм.

Для производства бесшовных труб диаметром от 16 до 426 мм с толщиной стенки от 2,0 до 2,5 мм из углеродистых, низко- и высоколегированных сталей используют трубопрокатные агрегаты с непрерывным станом, в котором получение черновой и готовой трубы осуществляется в многоклетевых непрерывных станах, позволяющих контролировать качество геометрии и поверхности труб.

На агрегатах с пилигримовым станом получают трубы диаметром от 21 до 720 мм и толщиной стенки от 2,5 до 80 мм. В отличие от автоматического и непрерывного станом особенностью пилигримовой прокатки состоит в том, что деформация осуществляется в ручьях валков переменного радиуса на цилиндрическом дорне. Этот способ характеризуется высокими единичными обжатиями и суммарными вытяжками, благодаря чему можно получать трубы высокого качества непосредственно из слитков [22].

Агрегаты с трёхвалковым раскатным станом дают возможность получать толстостенные трубы с точным размером диаметром от 40 до 200 мм и толщиной стенки от 45 до 50 мм. Допуски на толщину стенки примерно в 2-2,5 раза меньше, чем для труб, полученных другими способами горячей прокатки. При изготовлении черновой трубы на трубопрокатном агрегате с трёхвалковым раскатным станом на всех переделах деформация металла осуществляется винтовой прокаткой [22].

Агрегаты с речным станом применяют для получения труб диаметром от 57 до 219 мм и толщиной стенки от 2,5 до 15 мм, которые используются в качестве заготовок для производства прецизионных и холоднотянутых труб, так как они имеют качественную наружную и внутреннюю поверхности и сравнительно тонкие стенки [19]. На речных станах трубы получают протягиванием. Исходный материал – квадратная катаная заготовка, которую нагревают и прошивают на прессе в гильзу с доньшком или стакан,

поступающие затем на речный стан. В стакан вводится оправка, и он протягивается сквозь ряд колец с уменьшающимися диаметрами отверстий, при этом толщина стенки трубы постепенно уменьшается [23].

1.3. Технология производства труб на трубопрокатном агрегате с автоматстаном

Трубопрокатные агрегаты с автоматическим станом и станами-тандем относят к числу наиболее распространенных для производства бесшовных горячекатаных труб. На таких агрегатах производят свыше 30% всех горячекатаных труб.

Широкое распространение станы подобного типа получили благодаря ряду технологических достоинств:

- высокой маневренности, позволяющей в короткий промежуток времени осуществить переход с одного типоразмера прокатываемых труб на другой;
- универсальности, обеспечивающей производство труб широкого сортамента из разнообразных марок сталей и сплавов $D_0/S_0 = 4 \div 5 \dots 40 \div 50$;
- относительно высокой производительности при удовлетворительном качестве труб;
- высокой степени механизации и автоматизации производственного процесса [19].

Технологический процесс производства труб на агрегатах с автоматстаном состоит из последовательных операций, как видно на рисунке 1.1, основные из них: подготовка металла к прокатке; нагрев его перед прокаткой; прошивка заготовки в гильзу; прокатка труб в автоматическом стане; риллингование в обкатных машинах; калибрование или редуцирование труб, их охлаждение; отделка; приёмка и сдача годных труб на склад готовой продукции.

Заготовки в виде штанг длиной до 12,5 м подвергают входному контролю качества; годные заготовки передают на участок резки на мерные длины. Взвешенная и нагретая до температуры прошивки (в соответствии с

технологическими инструкциями) заготовка выдаётся из печи и центрируется на глубину 25-40 мм в горячем состоянии.

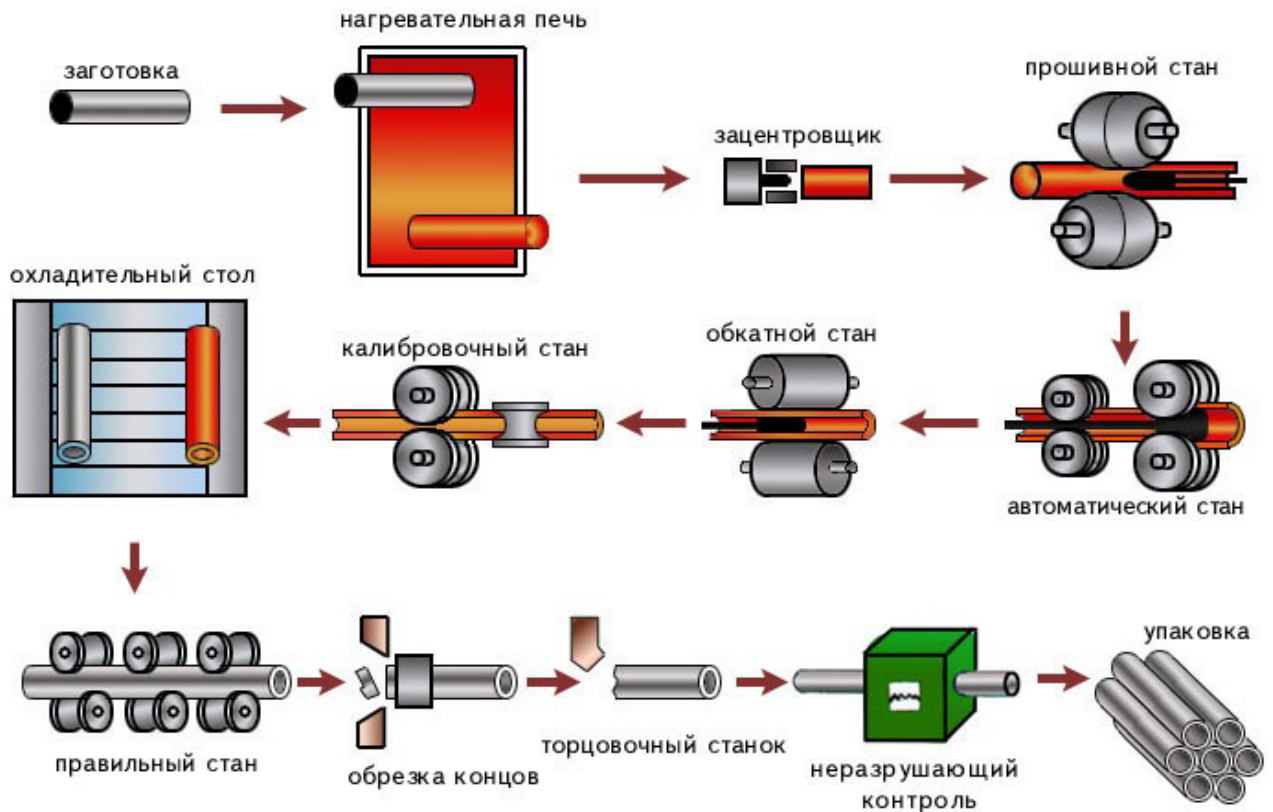


Рисунок 1.1 – Производственный процесс на установках с автоматическим станом АО «Первоуральский новотрубный завод» [pntz.tmk-group.ru]

Зацентрированная заготовка передаётся на входную сторону прошивного стана и задаётся в валки стана винтовой прокатки, где прошивается на короткой оправке в гильзу.

Схема прокатки труб на автоматстане представлена на рисунке 1.2.

Раскатка гильзы в трубу в автоматическом стане осуществляется в два прохода. Входная сторона автоматического стана обычно оборудована пневматическим вталкивателем, с помощью которого осуществляется задача гильзы в валки. Перед вторым проходом в автоматическом стане труба кантуется на 90° для того, чтобы выпуски на трубах попадали в вершину калибра при последующей продольной раскатке труб. После каждого прохода оправку удаляют со стержня, а рабочие валки разводят для передачи трубы на входную

сторону автоматического стана. Возврат трубы на входную сторону осуществляется роликами обратной подачи, которые расположены на выходной стороне стана и имеют направление вращения, противоположное направлению вращения рабочих валков. Валки автоматического стана многоручьевые с разными калибрами, что позволяет без перевалки прокатывать трубы различных диаметров. С этой целью передний стол может перемещаться и устанавливаться таким образом, чтобы ось входной стороны совпадала с осью требуемого калибра.

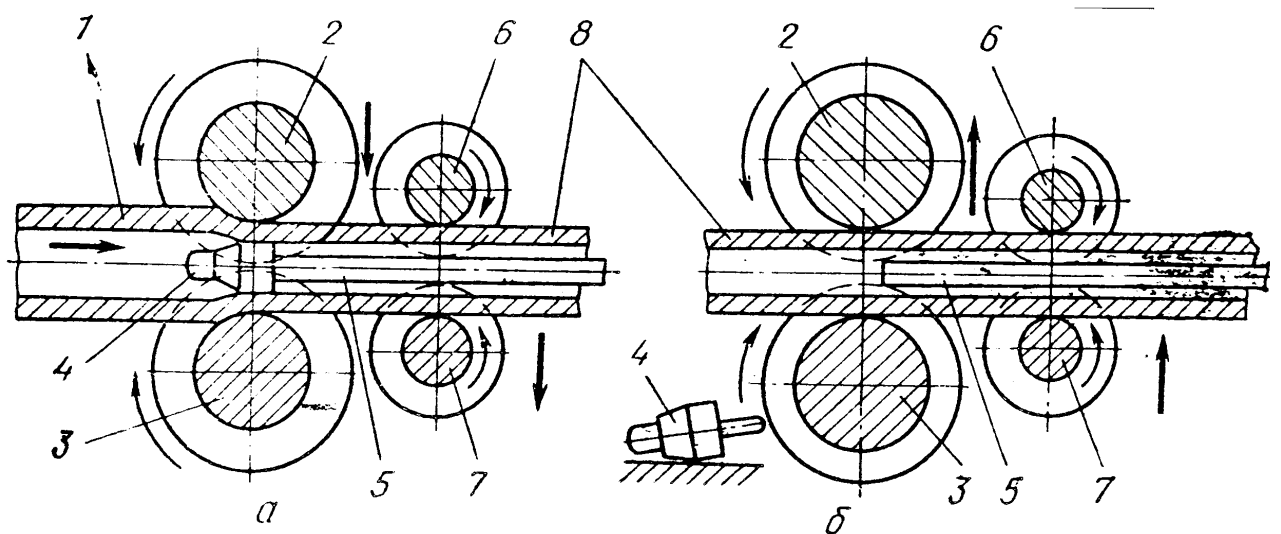


Рисунок 1.2 – Схема прокатки труб на автоматстане: *а* – прокатка; *б* – возврат трубы; 1 – гильза; 2 – верхний валок; 3 – нижний валок; 4 – оправка; 5 – упорный стержень; 6 – верхний ролик обратной подачи; 7 – нижний ролик обратной подачи; 8 – труба

Раскатанная в автоматическом стане труба по наклонной решётке передаётся к одной из двух обкатных машин. Наличие двух обкатных машин обусловлено тем, что производительность предшествующих станов – прошивного и автоматического в зависимости от сортамента прокатываемых труб в 1,3-2 раза выше, чем пропускная способность одной обкатной машины.

Обкатные машины предназначены для раскатки выпусков на поверхности труб, устранения продольных рисок на внутренней поверхности и снижения продольной и поперечной разностенности труб. Обкатанная заготовка осматривается на наличие поверхностных дефектов, перегрева и отклонений по

геометрии, в случае их наличия – бракуется, в случае отсутствия – передаётся далее к калибровочному или редуционно-калибровочному стану для придания окончательной геометрии (необходимого диаметра с высокой точностью геометрических размеров).

После калибровки трубы по рольгангу передаются на охлаждающие столы, которые, кроме основной функции (охлаждения труб), выполняют ещё и дополнительную – распределение труб по поточным линиям отделки. Если трубы не подвергаются термической обработке, то их сначала правят в 7-валковых косовалковых правильных машинах.

После правки обрезают утолщённые концы труб, выполняют резку на мерные длины и торцовку. Далее трубы передают на участок продувки для удаления стружки. В дальнейшем трубы поступают на инспекционные столы для контроля качества. Трубы, удовлетворяющие требованиям ГОСТ или ТУ, маркируют, пакетируют и передают на склад готовой продукции. Трубы, не соответствующие предъявляемым требованиям, подвергают ремонту, повторному контролю качества или бракуют [19].

1.4. Механические свойства сталей различных групп прочности

Современная трубопрокатная установка позволяет производить бесшовные трубы из широкого перечня сталей. Отдельные области применения труб накладывают высокие требования к используемому материалу, в результате чего химический состав стали, а, следовательно, их физико-механические свойства должны отвечать строгим критериям.

Качественные углеродистые стали характеризуются более низким [24], чем у сталей обыкновенного качества, содержанием вредных примесей и неметаллических включений. Их поставляют в виде проката, поковок и других полуфабрикатов с гарантированным химическим составом и механическими свойствами. Качественные углеродистые стали содержат от 0,06% до 0,65% углерода, количество вредных примесей не превышает 0,040% для серы и 0,035% для фосфора. В частности, сталь 45 [25], относящаяся к сталям группы прочности

Д, применяется для изготовления элементов бурильной колонны: ведущих труб и их переводников, бурильных труб и муфт к ним, утяжелённых бурильных труб, переводников для бурильных колонн, трубных заготовок стыко-сварных бурильных труб. Химический состав и механические свойства сталей группы прочности Д представлены на рисунке 1.3.

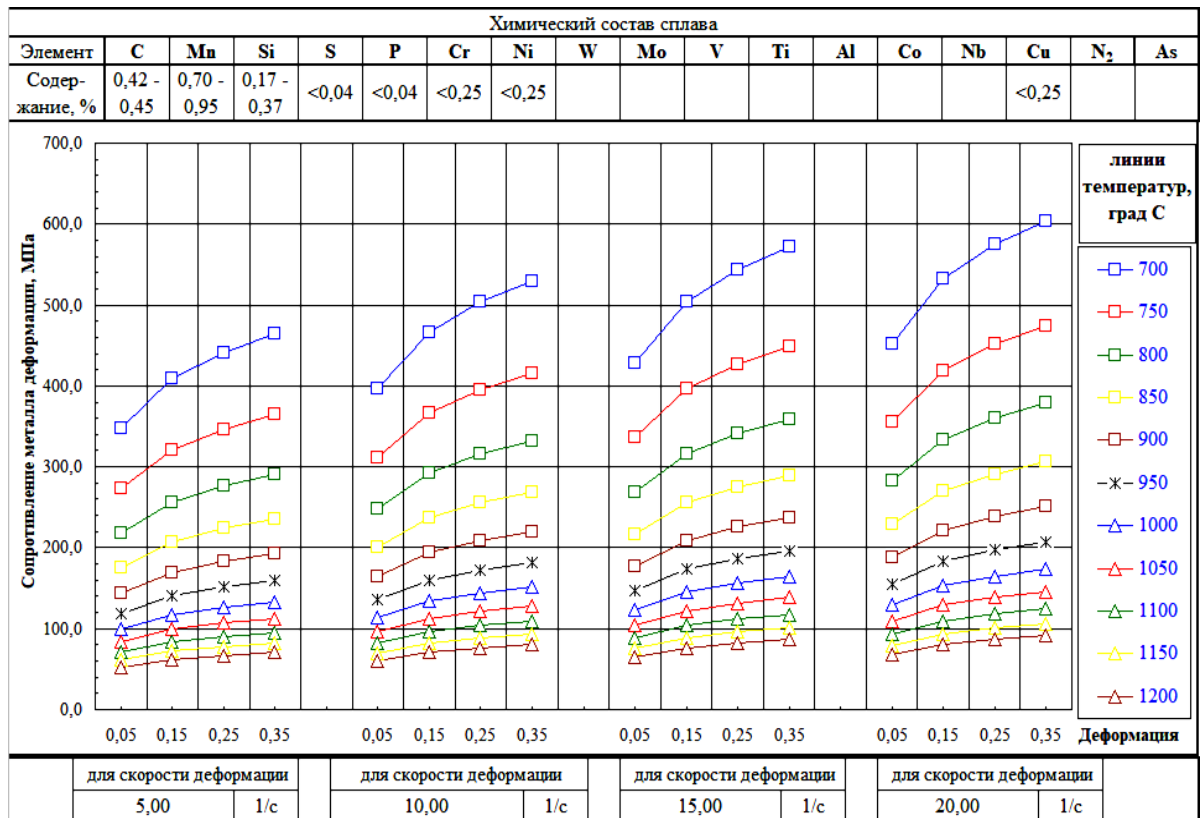


Рисунок 1.3 – Диаграмма механических свойств стали группы прочности Д

Конструкционные легированные стали в отличие от углеродистых включают химические элементы, позволяющие получить заданные свойства материала. Леггирующие добавки дают возможность улучшить механические, физические и химические свойства основного материала. Одним из таких материалов является сталь 37Г2Ф, данная марка стали относится к сталям группы прочности Е, которые используют в основном для производства креплений эксплуатационных скважин с температурой на устье 120–220 °С. По сравнению с трубами из стали марки Д трубы из легированных сталей обладают

большой коррозионной стойкостью и прочностью. Химический состав и механические свойства сталей группы прочности E представлены на рисунке 1.4.

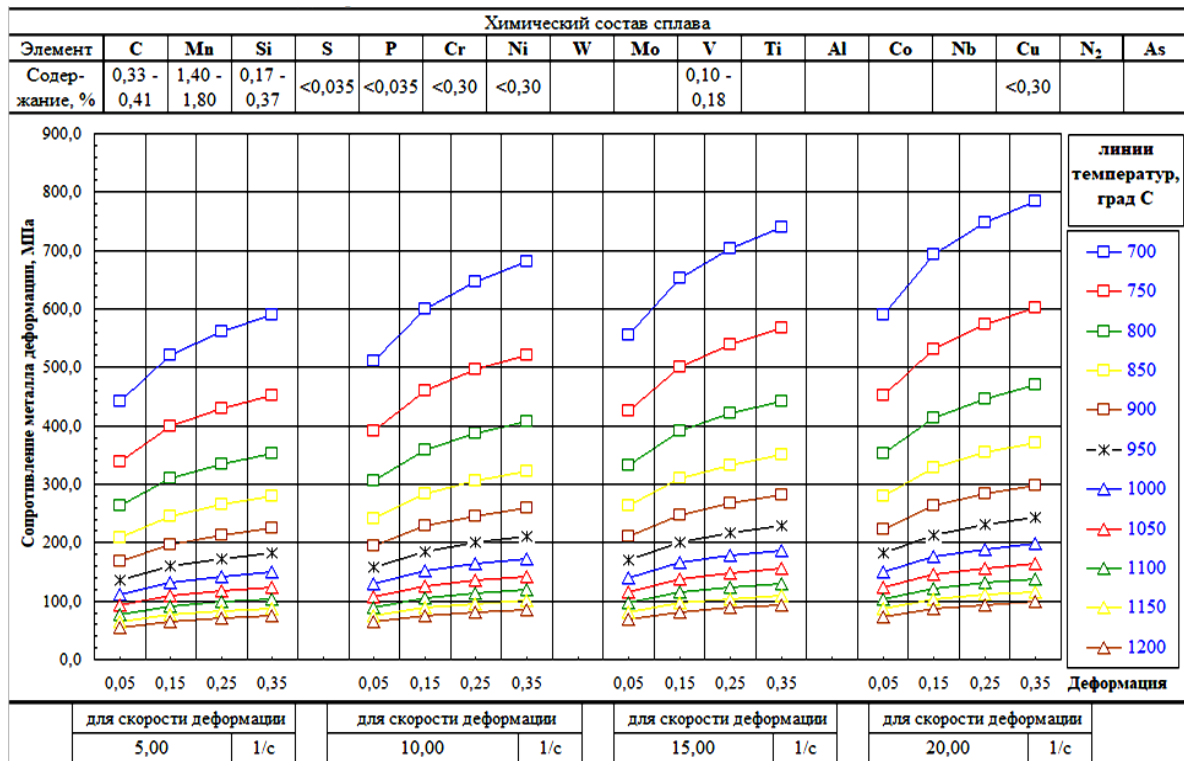


Рисунок 1.4 – Диаграмма механических свойств стали группы прочности E

1.5. Обзор дефектов, возникающих при производстве горячекатаных труб

К важнейшим характеристикам трубной продукции, определяющим её качество, относятся состояние поверхности, геометрия поперечного сечения на всей длине изделия и структура металла, а также локальные дефекты, возникающие на отдельных стадиях процесса производства, связанные с отливкой заготовки, режимами её деформации при обработке давлением, а также возможностями промежуточной и окончательной отделки [26].

На сегодняшний день по причинам происхождения виды дефектов, возникающие в процессе деформации металла при производстве труб, можно условно разделить на три типа:

- механические повреждения наружной и внутренней поверхности труб в результате использования некачественного технологического инструмента,

попадания окалины и других твёрдых инородных материалов на контактные поверхности инструмента и трубы;

- поверхностные повреждения, связанные с нарушением принятой технологии или неправильно выбранным режимом горячей деформации металла трубы;

- нарушения внутренней сплошности металла трубы, связанные с особенностями напряженно-деформированного состояния (НДС) в процессе деформации.

Некоторые виды дефектов являются следствием напряженно-деформированного состояния, полученного на предыдущей операции, и усугубляются или раскрываются при дальнейшей обработке [26].

Качество гильз для труб, изготавливаемых на трубопрокатных агрегатах с автоматическим станом, зависит от качества исходного металла, способов и режимов нагрева и прокатки заготовки, калибровки технологического инструмента прошивных станов. Внутренние дефекты, такие как плены и трещины, возникают из-за разрушения металла при прошивке в стане винтовой прокатки, когда в сердцевине заготовки появляются значительные растягивающие напряжения, а пластические свойства металла оказываются недостаточными. При дальнейшей прокатке эти разрушения не устраняются, а чаще развиваются вглубь стенки. Внутренние дефекты могут быть следствием пониженного качества металла. Очень опасным дефектом труб является расслоение металла при прошивке заготовок на станах винтовой прокатки. Этот дефект не выходит на поверхность и его трудно обнаружить. Основная причина расслоения – пониженная пластичность металла.

К появлению внутренних дефектов гильз, таких как борозд и порезов по винтовой линии, приводят износ оправок и неправильная их калибровка, отчего появляется повышенное сопротивление осевому продвижению заготовки. Порезы на наружной поверхности гильз по винтовой линии вызваны дефектами на валках и линейках в виде острых выступов и повышенного износа инструмента.

Неправильная настройка прошивного стана или отклонение от оптимального температурного режима прошивки являются причиной такого дефекта как разностенность гильз, которая не может быть исправлена при дальнейшей прокатке. Такой вид дефекта особо опасен при производстве труб из малопластичных сталей. Применение заготовки, диаметр которой больше диаметра гильзы, приводит к заметному росту продольной разностенности гильзы.

При раскатке гильз в автоматическом стане из-за неправильной настройки или повышенного износа инструмента могут возникать дефекты в виде продольных рисок на внутренней поверхности трубы; «скворечники» и поперечные разрывы; вмятины, раковины, бугры, продольные подрезы, заусенцы, усы, бунты, расслоения, трещины на её поверхности. Дефекты в виде продольных швов или бунтов и ужимов образуются из-за переполнения калибров валков, неравномерного износа валков, неудовлетворительной настройки станов.

Трубы, прокатанные на автоматическом стане, могут иметь на внутренней поверхности риски большей или меньшей глубины. Это является большим недостатком процесса прокатки на данном стане, поскольку требует дополнительной раскатки трубы на обкатных станах с его перенастройкой и повышенными режимами деформации. Глубокие риски трудно устранять, и они остаются на готовой трубе.

Весьма распространённой причиной отбраковывания труб после раскатки в автоматстане является отклонение толщины стенки от номинальных размеров сверх допустимых пределом. Возникновение такого брака может быть вызвано повышенной разностенности гильзы, задаваемой в автоматстан.

При калибровке трубы возможно следующие виды брака: овальность, подрезы, насечка, рванины, ужимы, смятие. Причиной овальности трубы является выработка калибров валков числовых клетей. Подрезы на трубах появляются из-за неточной настройки стана, смещения валков в осевом направлении или поступления в стан трубы увеличенного диаметра. Появление

дефектов в виде насечек и рванин на трубе вызвано налипанием металла на поверхность валков. Ужимы и смятие происходит так же из-за поступления в калибровочный стан трубы увеличенного диаметра.

Все эти дефекты являются причиной снижения выхода годного металла, выбраковки изделий, а также появления повышенных и ударных нагрузок на рабочей линии главного привода стана и силовые элементы прокатных клетей.

В ходе исследования [27] обнаружен новый тип дефекта, характерный для раскатки тонкостенных гильзы на автоматическом стане. Гипотеза его появления состоит в том, что стеснённая деформация при раскатке гильзы на автоматическом стане приводит к образованию на задних концах трубы выпуски – продольных «плавников» переменной высоты, как показано на рисунке 1.5. При передаче на обкатной и калибровочный станы плавники прижимаются к боковой поверхности трубы и образуют складки, несплошности заднего конца, местные утолщения и потерю устойчивости при деформации. Образование данного дефекта и его попадание в последующие клетки сопровождается появлением пиковых нагрузок.

1.6. Применение поперечно-винтовой раскатки труб в установках с автоматическим станом

Для получения готовых труб применяют станы поперечно-винтовой прокатки (обкатные станы) и безоправочные станы продольной прокатки. Обкатные станы используются в трубопрокатных агрегатах, где основным раскатным станом являются автоматический двухвалковый стан и речный стан [28].

Обкатные двух- или трёхвалковые станы винтовой прокатки предназначены для раскатки поверхностных неровностей, продольных рисок на черновых трубах, возникающих в результате износа калибра валков, а также повышают точность геометрических размеров труб. В процессе прохождения через валки заготовка раздается по диаметру на цилиндроконической оправке и одновременно калибруется по толщине стенки. При обкатке обычно

увеличивается диаметр трубы, устраняется её овальность; изменение диаметра трубы и её толщины стенки во многом зависит от сортамента прокатываемых труб, режимов обкатки, калибровки технологического инструмента и конструкции обкатных машин.

для трубы 219×7



для трубы 219×8



для трубы 219×12



Рисунок 1.5 – Дефект прокатки: выпуски на задних концах трубы – продольные «плавники» переменной высоты

В зависимости от количества валков стан имеет индивидуальный привод на каждый валок, или групповой привод. Рабочая линия включает

электродвигатель, промежуточный вал, шестеренную клетку (в случае группового привода) и шпиндельное устройство. Валки устанавливаются в подушки с барабанами, которые позволяют регулировать угол подачи заготовки. Оправка удерживается между валками на длинном стержне, который закрепляется на выходной стороне обкатного стана.

В технологической цепочке ТПА-220 цеха №1 АО «Первоуральский новотрубный завод» предусмотрено две обкатные машины, на которые с помощью боковой выдачи передаётся черновая труба: №1 – ближе к оси прокатки автоматического стана и №2 – расположенный несколько дальше. Обкатной стан в составе ТПА-220 цеха №1 АО «Первоуральский новотрубный завод», является двухвалковым нереверсивным станом винтовой прокатки с групповым приводом валков. Принципиальная схема привода стана поперечно-винтовой прокатки показана на рисунке 1.6.

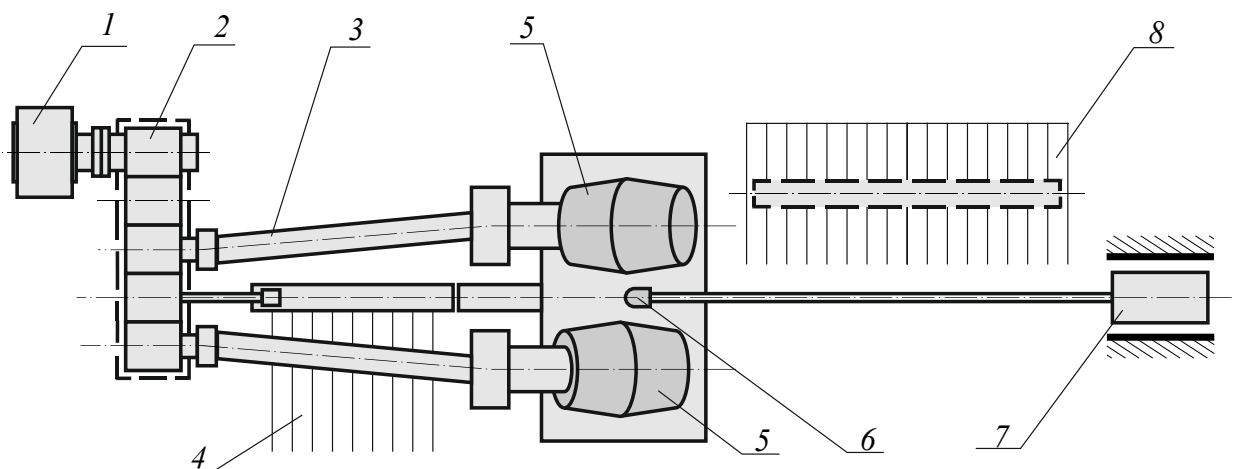


Рисунок 1.6 – Принципиальная схема привода стана поперечно-винтовой прокатки: 1 – главный электродвигатель стана, 2 – комбинированный редуктор-шестеренная клетка, 3 – универсальные шпиндели, 4 – стол загрузки, 5 – прокатные валки, 6 – оправка, 7 – устройство для установки и перемещения оправки; 8 – наклонный стол

1.7. Описание очага деформации в процессе поперечно-винтовой прокатки

При поперечно-винтовой прокатке основное движение и формоизменение металла происходит под действием сил трения на контактной поверхности

металла с валками. Первоначально заготовка задаётся во вращающиеся валки пневматическим толкателем, который обеспечивает задачу трубы в клеть до момента естественного захвата заготовки валками. Валки вращаются в одну сторону и развёрнуты на некоторый угол, благодаря чему обкатываемой трубе придаётся не только вращательное, но и поступательное движение. Особенностью конструкции обкатных машин является боковое (горизонтальное) расположение валков. Для поддержания трубы снизу располагается плоская проводка с входным и выходным коническим и рабочим цилиндрическим выемками по направлению перемещения трубы.

Процесс поперечно-винтовой обкатки осуществляется за счёт периодической деформации элементарного объёма металла ΔV_0 . Основное обжатие происходит между прокатными валками, которые искривляют геометрию заготовки. В дальнейшем при попадании на оправку заготовка раздаётся по диаметру, обеспечивая своеобразный подъем без значительного изменения толщины стенки. Ввиду относительно малого перехода по диаметру и толщине стенке, который происходит при операции обкатки, зона контакта между валком и трубой невелика. В отличие от операции прошивки, при которой направляющие линейки играют роль, которая обеспечивает стабильность положения трубы между валками, нижняя линейка обкатного стана контактирует с трубой, практически не оказывая влияние на формоизменение металла [26].

По аналогии с операцией элонгирования или раскаткой в трехвалковом раскатном стане в продольном направлении можно выделить три зоны, как показано на рисунке 1.7.

На участке *1*, который начинается от контакта заготовки с валками до момента касания внутренней стенки трубы оправки, происходит первичный захват трубы валками, уменьшение диаметра без контроля толщины стенки и под действием сил трения на контактной поверхности металла с валком придание вращения и осевого движения трубы.

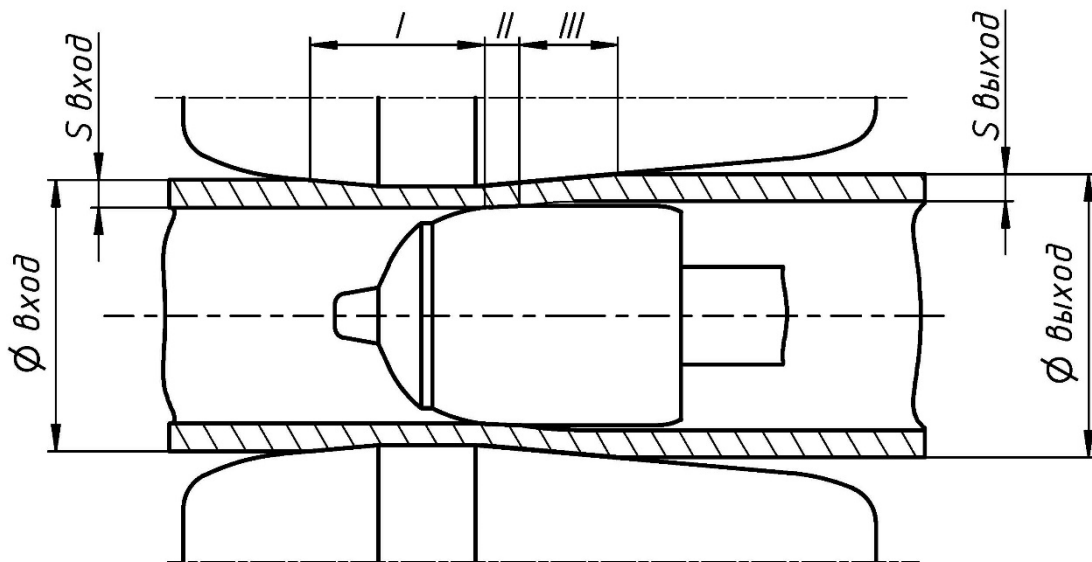


Рисунок 1.7 – Схема обкатки трубы:

I-зона редуцирования; *II*-зона раскатки на оправке; *III*-зона обкатки трубы

На участке *II* производится утонение стенки (и придание ей более равномерной толщины) за счёт сдавливания между валком и оправкой симметрично относительно оси прокатки. В результате обжатия трубы по стенке от $S_{вход}$ до $S_{выход}$ металл раскатывается в направлении вращения и получает удлинение в направлении осевого перемещения. В данной зоне возможен контакт между проводкой и трубной заготовкой. В связи с этим ось прокатки должна быть ниже оси стана на 16-35 мм. Занижение оси прокатки достигается советующей высотой линейкодержателя и толщиной линейек. Занижение оси прокатки определяется положением линейки в вертикальной плоскости, которое проверяется по расстоянию от верхней плоскости линейкодержателя до горизонтальной плоскости разъёма рабочей станины. Расстояние от верхней плоскости линейкодержателя до горизонтальной плоскости разъёма рабочей станины в зависимости от диаметра труб показано в таблице 1.1.

На линии снятия трубы с оправки, за счёт небольшой раздачи («подъёма») трубы по внутреннему диаметру начинается зона *III* обкатки заготовки при котором происходит калибрование трубы по наружному диаметру.

Таблица 1.1 – Расстояние от верхней плоскости линейкодержателя до горизонтальной плоскости разъёма рабочей станины

Диаметр трубы, мм	Расстояние от верхней плоскости линейкодержателя до горизонтальной плоскости разъёма рабочей станины, мм
121 мм	610–611 мм
127–168 мм	645–646 мм
180–219 мм	681–682 мм

В поперечном сечении очага деформации стана винтовой прокатки можно выделить зоны основной и вспомогательной деформации, а также внеконтактные зоны. Зона основной деформации расположена между дугами контакта валков с заготовкой и оправки с заготовкой. Вспомогательная деформация происходит в объёме трубы, попадающем в зазор между оправкой и линейкой (для обкатного стана она не значительна).

Технологически процесс винтовой прокатки характеризуется коэффициентами осевой вытяжки $\mu = \frac{(D_a - S_a)S_a}{(D_p - S_p)S_p}$; коэффициент обжатия по стенке трубы $\lambda = \frac{S_p}{S_a}$; коэффициент обжатия по среднему диаметру трубы $k = \frac{D_a - S_a}{D_r - S_r}$.

Суммарный коэффициент вытяжек определяют как произведение частных вытяжек:

$$\mu_{\Sigma} = \mu_1 \cdot \mu_2 \dots \mu_n, \quad (1.1)$$

где n – число циклов частных деформаций по длине очага от сечения входа трубной заготовки до ее выхода из валков.

Общая длина поверхности контакта металла с валком L_B определяется как сумма длин конусов редуцирования $l_{\text{вх}}$ и обкатки $l_{\text{вых}}$:

$$L_B = l_{\text{вх}} + l_{\text{вых}}. \quad (1.2)$$

Без учёта искажения очага деформации из-за разворота валков на угол подачи β длина очага деформации определяется следующим образом [Осадчий]:

$$l = \frac{D_a - D_{\Pi}}{2 \operatorname{tg} \alpha_1} + \frac{D_{\text{об}} - D_{\Pi}}{2 \operatorname{tg} \alpha_2}, \quad (1.3)$$

где D_a – диаметр трубы после раскатки на автоматстане;

$D_{\text{об}}$ – диаметр трубы после обкатки;

$D_{\text{п}}$ – диаметр заготовки в пережиге;

α_1, α_2 – углы наклона образующих конусов валков.

Для расчёта площади горизонтальной проекции контактной поверхности F очаг деформации делят на n участков длиной $\Delta l = l/n$, в каждом сечении рассчитывают ширину контактной поверхности b_i и затем суммируют по участкам:

$$F = \sum_{i=1}^n \frac{b_i + b_{i+1}}{2} \Delta l . \quad (1.4)$$

Также можно использовать упрощённую формулу:

$$F = F_1 + F_2 = b_{1\text{ср}} l_1 + b_{2\text{ср}} l_2 , \quad (1.5)$$

где $F_1, b_{1\text{ср}}, l_1, F_2, b_{2\text{ср}}, l_2$ – соответственно площади контактной поверхности, средняя ширина и длина контактной поверхности в конусах редуцирования и обкатки.

Средняя ширина контактной поверхности в перечисленных зонах может быть приближённо рассчитана по экспериментальным формулам

$$\begin{aligned} b_{1\text{ср}} &= 0,67b_{\text{п}}; \\ b_{2\text{ср}} &= 0,8b_{\text{п}}; \end{aligned} \quad (1.6)$$

где $b_{\text{п}}$ – ширина контактной поверхности в сечении пережиге.

1.8. Теоретические исследования процесса поперечно-винтовой прокатки полых заготовок

Поперечно-винтовая прокатка относится к наиболее сложным в теоретическом плане процессам обработки давлением, отличается пространственным характером течения, при котором внешние и внутренние контуры материала в очаге деформации являются сложными поверхностями, вид которых изменяется во времени [29]. Для технологических линий производства горячедеформированных труб в трубопрокатных агрегатах поперечно-винтовая прокатка реализована для прошивки заготовок, раскатки гильзы в черновую трубу, обкатки заготовки с целью отделки и калибровки трубы.

Наибольшее количество исследований [1-17] уделено вопросам прошивки сплошной заготовки в толстостенную гильзу в связи с наиболее сложным напряженно-деформированным состоянием металла, влиянием операции прошивки на качество готовой трубы и максимальных нагрузок, которые действуют в данной стадии по сравнению с другими. Таким образом, большинство исследований рассматривали операции, осуществляемые способом поперечно-винтовой прокатки, как модификации операции прошивки. Таким образом, при достаточно подробной проработке с точки зрения теории и эксперимента в ряде случаев возникает ряд особенностей, которые необходимо рассматривать для конкретного процесса поперечно-винтовой прокатки.

Основными задачами, которые ставили перед собой исследователи процесса являлись определение напряженно-деформированного состояния в очаге деформации, расчёт энергосиловых параметров процесса, определение условий протекания процесса с учётом стабильности процесса. При этом большинство авторов рассматривает процесс установившейся прокатки.

Рассматриваются вопросы захвата заготовки валками, в частности, выделяются два вида захвата заготовки [28]: первичный, при котором заготовка первоначально касается валков и получает вращательное и поступательное движение, и вторичный, соответствующий следующему далее моменту, когда заготовка при своём осевом перемещении встречает сопротивление со стороны гребня валка (для случая прокатки полых заготовок). Теоретически установлено, что первичный захват происходит, когда выполняется условие:

Решение этой зависимости дано П.К. Тетериним [29] и выражается следующей формулой:

$$f \geq \sqrt{tg^2(\varphi - \alpha_1) + \frac{\pi}{2}(1+i)tg(\varphi - \alpha_1)tg\beta} \quad (1.7)$$

где α_1 – угол входного конуса;

f – коэффициент трения;

i – отношение радиуса слитка к радиусу валка.

На условия вторичного захвата оказывает влияние отношение диаметров заготовки и валков. Обжатие перед оправкой должно быть больше минимального значения, определяющего вторичный захват. Полную деформацию заготовки в данном диаметральном сечении можно разделить на четыре составляющие деформации: вдоль продольной оси трубы (вытяжка); обжатия по стенке; в диаметральной плоскости (редуцирование); скручивания, которая может быть охарактеризована, например, по деформации наиболее растянутого волокна:

$$\varepsilon_{кр} = \frac{\varphi_r}{2} + \frac{1}{2} \sqrt{\varphi_r^2 + 4} \quad (1.8)$$

где $\varphi_r = r\theta$ – угол скручивания;

r – радиус заготовки на выделенном участке;

θ – угол относительного поворота (закручивание) диаметральных сечений, соответствующих концам выделенного участка.

Авторы [30] указывают, что величина деформации не только в значительной степени определяет возможности осуществления процесса прокатки, но и может приводить к появлению на трубах необратимых дефектов (гранение, раструбы, искажение профиля, разрыва концов) за счёт различия в скоростях валков и заготовки, что наиболее опасно при прокатке тонкостенных труб.

Полная величина степени деформации в плоскости редуцирования оказывает существенное влияние на форму и размер контактной поверхности металла с прокатным инструментом, что отражается на энергосиловых параметрах процесса и точности геометрии прокатываемых труб.

Экспериментальные работы показали [31], что усилия на валки при поперечно-винтовой прокатке зависят от ряда технологических факторов: температура процесса, геометрии заготовок, скоростных условий прокатки (связанных с осевым и тангенциальным скольжением заготовки в калибре), а также степени деформации.

Для аналитического определения усилий со стороны металла на валки прокатного стана винтовой прокатки рассматривают связь между средним давлением металла на валки и величиной нормальных напряжений [32]:

$$p_{\text{ср}} = n'_\sigma n''_\sigma \sigma \quad (1.9)$$

для конуса прошивки n'_σ увеличивается, а коэффициент n''_σ уменьшается от входа к пережиму валка.

Разделяя среднее давление для конусов валкового инструмента и соотнося их с упрощёнными формулами для нахождения контактной поверхности между заготовкой и валками в каждом конусе по формуле (1.5), можно выполнить оценку верхнего порога нормальных усилий в заготовке.

По результатам обработки экспериментальных и расчётных данных А.П. Чекмаревым, Я.Л. Ваткиным, М.И. Ханиным и другими получены эмпирические зависимости для определения средних нормальных напряжений по дуге контакта в конусе прошивки:

$$p_{\text{ср.1}} = (1,8 - b_{\text{п}}/2r_{\text{п}})(1 - 2,7\delta_x^2)\sigma_{\text{н}}^{\text{ср}} \quad (1.10)$$

где $b_{\text{п}}/2r_{\text{п}}$ – определяется для перебежика валков,

$\sigma_{\text{н}}^{\text{ср}}$ – для среднего сечения очага деформации в конусе прошивки.

Средние нормальные напряжения в конусе раскатки ориентировочно можно определить по соотношению $p_2^{\text{ср}} \approx 0,75p_1^{\text{ср}}$

А.И. Целиков предложил формулу [31] для определения удельного давления при винтовой прокатке, которая может быть использована для зоны деформации сплошной заготовки:

$$p = 2\sigma_{\text{T}}(1,25 \ln \frac{2r_x}{b_x} + 1,25 \frac{b_x}{2r_x} - 0,25) \quad (1.11)$$

где σ_{T} – предел текучести при заданной температуре прокатки.

Также для оценки нормального давления очаге деформации можно воспользоваться формулой Прандтля:

$$p = 2\sigma_{\text{T}}(1 + 0,5\pi) \approx 5,14\sigma_{\text{T}} \quad (1.12)$$

Также для ориентировочных расчётов можно применять следующую формулу Ю.Ф. Шевакина [32]:

$$P = 3D_0 \quad (1.13)$$

Аналитическое решения для определения осевых усилий, действующих на оправку, достаточно затруднено, в связи с чем большинство авторов сходятся на диапазоне значений, зависящих от отношения осевого усилия к усилию прокатки, в случае прокатки в риллинг-стане $Q/P = 0,35-0,50$. С учётом сопротивления, возникающего на проводковом инструменте (при его наличии) суммарный момент прокатки рассчитывается как сумма произведений каждой составляющей силы на плечо действия относительно оси прокатного валка.

Более поздние исследования с расширением возможностей расчёта посвящены отдельным сторонам процессов поперечно-винтовой прокатки с целью решения, в большинстве случаев, прикладных задач реального производства.

Ряд исследований использует упрощения, которые позволяют оценивать процессы винтовой прокатки с учётом различного типа инструмента и особенностей конструкции. В работе [33] на основе энергостатического метода получены уравнения для определения нормального давления на валках, оправке и направляющих приводных дисках двухвалкового стана винтовой прошивки. Исследование Карпова С.М., Колесникова А.Г. и Никулина А.Н. [34] имело целью моделирование процессов винтовой прокатки путём комбинации процессов поперечной осадкой с привлечением теории колебаний для выявления связи между прочностными свойствами металла и размера заготовки на величину единичного критического обжатия, способное вызвать осевое разрушение заготовки. Экспериментальные работы [35] вопросам скручивания заготовки при прокатке в двухвалковой клети прошивного стана.

Многие работы направлены на внедрение новых технологий получения горячедеформированных труб на основе изменения и модернизации технологий поперечно-винтовой прокатки на основе научных исследований процесса. Для трёхвального обкатного стана ТПА-140 предложена новая схема прокатки «размер в размер» [36]. С целью расширить сортамент принято производимых толстостенных труб на агрегатах с раскатным станом предложен способ

нивелирования «раструба» [37]. Ряд авторов [38, 39] исследуют процесс раскатки тонкостенных труб в трехвалковых станах поперечно-винтовой прокатки с целью поиска оптимальных параметров настройки рабочей клетки, при которых сократится длина утолщённого заднего конца трубы, снизится разностенность и продольные дефекты труб.

Как отмечают в некоторых исследованиях [40, 41] при увеличении угла подачи до 20-25° процесс поперечно-винтовой прокатки будет точнее называть процесс радиально-сдвиговой прокатки. В работах на основе совместно моделирования и экспериментальных исследований предлагаются способы высокоэффективного производства толстостенных прецизионных труб в трёхвалковых станах поперечно-винтовой прокатки.

Большой объем исследований процессов прошивки и поперечно-винтовой прокатки полых заготовок базируется на КЭ анализе, в том числе, с применением программных комплексов DEFORM и QFORM [42-47]. Постановка данных исследований позволяет оценить достаточно большой объем факторов, влияющих на очаг деформации при прошивке труб, что приводит к разнообразному характеру течения металла, изменению энергосиловых параметров и способствует выведению критериев для оценки дефектообразования, как соответствующей конкретной операцией обработки давлением, так и за счёт предыдущих этапов обработки заготовки. Данные результаты могут опосредованно свидетельствовать о возможности применения КЭ анализа к процессу поперечно-винтовой обкатки труб после автоматического стана.

В то же время необходимо отметить, что процесс обкатки бесшовных труб на трубопрокатном агрегате с автоматстаном является дискретным и имеет ряд существенных особенностей, что требует собственной объёмной постановки задачи и последующего варьирования исходных параметров.

1.9. Постановка задачи исследования

При исследовании обкатки необходимо решить задачу по определению напряженно-деформированного состояния трубы, прокатываемой в обкатной машине трубопрокатного агрегата способом поперечно-винтовой прокатки в объёмной постановке, позволяющей выполнить его многофакторную оценку.

На основе теоретического исследования получить данные о конечном формоизменении заготовки после выхода из клетки обкатного стана, позволяющего оценить геометрию трубы с целью оценки размеров дефектных участков, а также изменение энергосиловых параметров процесса при различных стадиях обкатки.

Для верификации данных теоретического исследования выполнить экспериментальные измерения на реально действующем оборудовании аналогичного трубопрокатного агрегата на основе измерения уровня нагруженности путём тензометрических методов и замеров токовых скоростных характеристик приводов.

Выполнить опытно-статистическую обработку полученных результатов для нескольких типоразмеров прокатываемых труб (различающихся по маркам сталей и геометрическим размерам сечений), с целью получения уточнённых данных по нагрузкам в рабочей клетке и линии привода. Осуществить согласование данных теоретических и экспериментальных исследований в виде зависимостей энергосиловых параметров от нескольких переменных, характеризующих реологические свойства заготовки, режим обкатки и геометрию исходной и получаемой труб.

С позиции обеспечения надлежащего качества выпускаемых труб выдать перечень рекомендаций по рациональному ведению процесса обкатки горячедеформированной трубы в обкатной машине после автоматического стана трубопрокатного агрегата способом поперечно-винтовой прокатки на конической оправке с учётом возможного расширения сортамента и более экономичного профиля трубы.

1.10. Выводы по главе 1

1. Рассмотрены основные требования к трубной продукции с учётом ужесточения минимального уровня физико-механических свойств и отклонений по геометрии для современного уровня производства горячекатаных труб.

2. Произведена оценка основных технологических линий производства горячекатаных труб; показана востребованность линий, основанных на применении автоматического стана (или стана тандем) в качестве основного агрегата, его особенности и типовая компоновка данного вида трубопрокатной установки.

3. Перечислены основные виды дефектов труб, возникающих при их производстве на трубопрокатной установке с автоматическим станом. Описан новый вид дефектов, проявляющихся на тонкостенном сортаменте труб в задней концевой части.

4. Для способа производства трубы путём продольной прокатки на короткой оправке показана актуальность применения отделочных операций на обкатных машинах с целью устранения остаточных овальности и разнотонности труб.

5. Обзор существующих теоретических исследований процесса поперечно-винтовой прокатки трубы позволяет сделать вывод о необходимости уточнения теоретических представлений о процессе обкатки трубы после автоматстана с целью выявления данных о энергосиловых параметрах процесса в условиях искажения геометрии черновой трубы и различных настройках прокатного инструмента.

ГЛАВА 2. МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА ПОПЕРЕЧНО-ВИНТОВОЙ ПРОКАТКИ НА ОБКАТНЫХ СТАНАХ ТРУБОПРОКАТНЫХ УСТАНОВОК

2.1. Выбор метода теоретического исследования

В теории пластичности [48] получены решения для расчёта параметров процессов прокатки, прессования, выдавливания, волочения и т.п., но ни одно из решений не применяется при проектировании процессов обработки материалов. На практике инженера-исследователя интересует прежде всего получение решения, с достаточной точностью позволяющего адекватно описать закономерности реальных технологических процессов, в которых будут учтены наиболее влияющие факторы, удобного для использования в условиях производства.

Другими словами, прямое решение полной системы дифференциальных уравнений теории пластичности, включающей уравнения связи напряженного и деформированного состояния, уравнения движения, уравнение неразрывности, уравнение теплопроводности и т.д. [49] затруднено из-за большого количества объема требуемых вычислений. Поэтому были разработаны и используются на практике методы, основанные на допущениях, позволяющих уменьшить число уравнений при рассмотрении состояния деформированного тела. К достоинствам теоретических методов исследования процессов обработки материалов давлением можно отнести то, что получаемые в ходе решения функциональные зависимости, позволяют оценить влияние тех или иных факторов на параметры процесса и тем самым способствующие его усовершенствованию. Полученные решения обеспечивают разработку новых режимов ведения и корректировку действующих технологических процессов с высокой манёвренностью. Рассмотрим следующие из них:

- Инженерный метод.
- Метод линий скольжения.
- Метод сопротивления материалов пластическим деформациям.

- Метод баланса работ.
- Вариационные методы.
- Метод конечных элементов.

Инженерный метод (или метод совместного решения приближенных уравнений равновесия и пластичности) получил широкое распространение благодаря работам Е.П. Унксова [50, 51], А.И. Целикова [52, 53], С.И. Губкина [54], Л.Е. Альшевского [55] и др. для конкретных процессов обработки металлов давлением. Этот метод предназначен для определения нормальных напряжений только на контактной поверхности заготовки и инструмента. Это позволяет использовать одно уравнение равновесия и заменять в нем частные производные обычными. Инженерный метод наиболее прост и нагляден, что способствует его широкому распространению. Вместе с тем применение данного метода ограничено рассмотрением осесимметричных и плоских задач, а также он не пригоден для решения задач формоизменения.

Метод линий скольжения был разработан А.Д. Томленовым [56, 57], В.В. Соколовским [58], Р. Хиллом [59] и др. В основе метода лежит построение сетки линий скольжения и использование их свойств, которые позволяют упростить дифференциальные уравнения равновесия. Метод линий скольжения прост в применении, позволяет определять распределение напряжений в объеме тела. Но при таком методе трудно учесть непределённое контактное трение и упрочнение материала, а практическое использование результатов сводится к решению каждый раз частной задачи с грубыми допущениями и большим объёмом построений и вычислений. При этом надёжность и точность расчётных зависимостей, распространяемых на осесимметричную деформацию, весьма невысоки [49].

Объединение ряда способов аналитического и экспериментального исследований Г.А. Смирновым-Аляевым и его сотрудниками [60] позволило получить метод сопротивления материалов пластическим деформациям. Метод позволяет анализировать достаточно сложные процессы обработки металлов давлением. В основу метода положено совместное решение системы

дифференциальных уравнений движения и уравнений связи напряжений и деформаций. Область применения метода ограничивается решением задач на конечное формоизменение.

Метод баланса работ (мощностей) или энергетический метод основан на экстремальных принципах механики деформируемого твёрдого тела. В классическом виде (при использовании лишь основного энергетического уравнения без последующего дополнения его уравнениями равновесия и уравнениями связи между напряжениями и деформациями) метод не позволяет определить параметры напряженного состояния в очаге пластической деформации и найти распределение напряжений на контактных поверхностях заготовки и инструмента, т.е. метод баланса работ достаточно удобен для определения энергосиловых параметров в процессах ОМД и наиболее эффективен в сочетании с экстремальными принципами. В этом случае становится возможным и описание формоизменения. Метод применялся в исследованиях А.Ф. Головина, М.В. Сторожева [61], И.Л. Перлина [62], В.Н. Выдрина [63, 64] и др. В основе метода баланса работ лежит положение о том, что в процессе пластической деформации работа внешних сил на соответствующих им перемещениях равна сумме работ внутренних сопротивлений.

Вариационные методы использовали в своих исследованиях И.Я. Тарновский [65], В.Л. Колмогоров [66, 67], Г.Я. Гун [68, 69] и др. Методы базируются на составлении и решении вариационного уравнения принципа виртуальных скоростей и напряжений. Вариационные методы позволяют решать задачи по определению параметров формоизменения, распределения напряжений в объёме рассматриваемого тела для трёхмерных задач. Среди недостатков методов можно отметить зависимость решения от случая удачного выбора подходящих функций описывающих поля деформаций и напряжений, а также сложности численной реализации при большом количестве варьируемых параметров.

Метод конечных элементов (МКЭ), в развитие которого внесли свой вклад О. Зенкевич [70, 71], С. Кобаяши [72], Р. Галлагер [73] и др., на сегодняшний день получил наиболее широкое распространение в связи с развитием вычислительной техники, а также обширными возможностями по решению задач определению напряженно-деформированного состояния тела, теплового состояния и других задач, моделирующих поведение в сплошных средах. По своей сути МКЭ представляет численную реализацию вариационного энергетического метода. Ключевая идея МКЭ заключается в том [74, 75], что сплошная деформируемая среда моделируется путём её разбиения на области заданной формы (допускается линейная, плоская и объёмная постановка задачи). При этом полная энергия деформируемой системы представляет собой сумму энергий, относимых к соответствующему элементу, определяемому гранями, которые соединяют узлы. Используя соотношения для перемещений, выражают деформации, а затем и напряжения, которые будут являться функцией смещения узловых точек элемента. Далее полученные зависимости подставляют в выражения для потенциальной энергии деформации, представляя её как функцию узловых смещений (или скоростей). Полученная затем система линейных дифференциальных уравнений решается итерационными методами.

В настоящее время метод конечных элементов лежит в основе большинства программных комплексов для разработки и инжиниринга различных технологических процессов, входящих в металлургическую отрасль промышленности, с целью унификации результатов при поточном проектировании стадий производства потребительской продукции.

За прошедшие 30 лет уровень быстродействия вычислительных машин вырос в свыше 10^6 раз, что сделало возможным решать комплексные задачи из различных областей механики сплошной среды со сложными элементами геометрии контактных поверхностей при огромном объёме требуемых вычислений [76].

Все вышеперечисленные факторы обуславливают развитие и активное использование программных пакетов, в которых реализуется МКЭ, что в свою

очередь ведёт к всестороннему рассмотрению отдельных технологических процессов обработки металлов давлением для получения качественно новых результатов.

2.2. Обоснование расчётной схемы процесса поперечно-винтовой прокатки труб на обкатных станах

В общем случае расчётная схема технологического процесса ОМД строится на построении геометрии объектов, воздействующих на материал при деформировании, и сам объект деформации. С целью упрощения расчётной схемы [77], и минимизации потребляемых ресурсов, от некоторых составляющих процесса обкатки, присутствующих на реальном производстве (в частности, корпусных и опорных узлы стана, осей валков, элементов линии привода, подающих устройство и пр. решено отказаться, сократив схему до бочек обкатных валков (далее – валки), стабилизирующей оправки стана и направляющей проводки. При этом объекты моделирования задаются таким образом, чтобы их характеристики с достаточной точностью описывали воздействие объектов реального процесса обкатки. Так как заготовка при обкатке перемещается в трёхмерном пространстве по винтовой траектории, а оси вращения обкатных валков наклонены к оси перемещения заготовки на угол подачи, геометрическую схему необходимо формулировать в объёмной постановке.

Одна из задач работы направлена на выявление характера процесса при попадании в валки обкатной машины трубы с концевыми дефектами («плавниками»). Важным фактором является сравнение показателей процесса в «стационарной» стадии с аналогичными, полученными при обкатке повреждённых концов. Таким образом, нестационарной стадией задачи трубы в стан и захвата заготовки валками пренебрегаем, рассматривая процесс от момента нахождения в калибре черновой стана трубы, полученной после автоматического стана, до момента полного снятия обкатанного конца трубы с

оправки (при достижении значений прокатных усилий и моментов нулевых показателей).

Выбранная схема процесса обкатки представлена на рисунке 2.1. Как было описано в 1 главе, деформация осуществляется за счёт обкатывания валками заготовки, помещённой на конической оправке. Очаг деформации состоит из зоны между поверхностью контакта валков с трубой, трубы с оправкой и зоны соприкосновения трубы с проводкой и оправкой, а также внеконтактных зон.

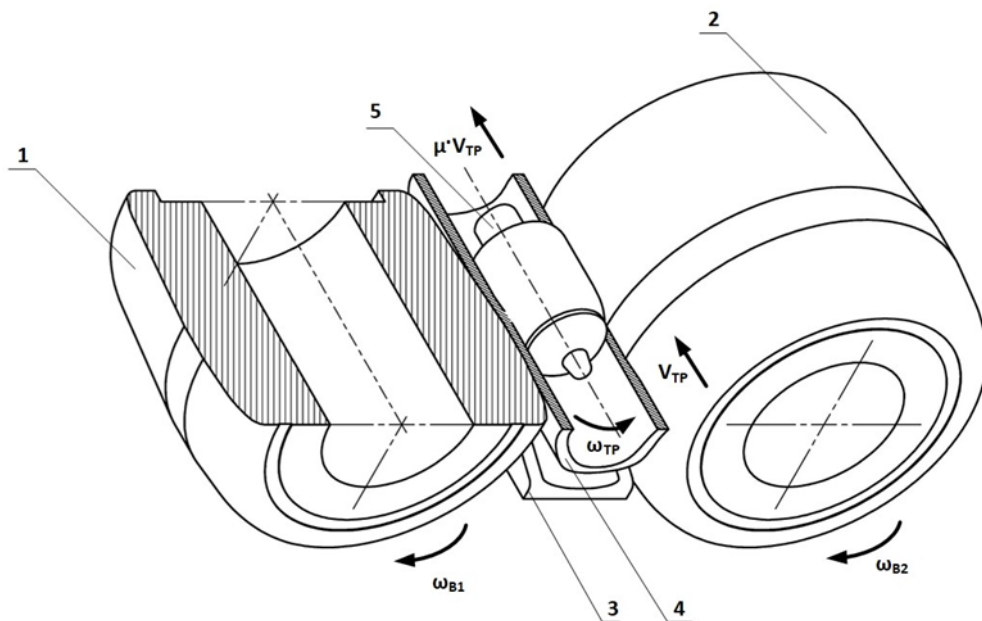


Рисунок 2.1 – Схема процесса обкатки: 1, 2 – валки обкатного стана; 3 – направляющая проводка; 4 – труба; 5 – оправка

Геометрия рабочих поверхностей инструмента выбирается в соответствии с данными размерам инструмента, по требованиям стандартов и технической документации на обкатной стан. Валки устанавливаются наклонно к оси заготовки на угол подачи с межвалковым расстоянием по калибру трубы. Размеры оправки и проводок выбираются по прокатываемому типоразмеру труб и рассчитаны согласно рекомендациям для расчёта таблиц прокатки [19]. Валки совершают сложное движение, сочетающее вращение вокруг своей оси и около заготовки. Оправка и проводка устанавливаются относительно прокатных валков в продольном направлении таким образом, чтобы избежать дефектов

трубы в виде скручивания, продавливания наружной поверхности рабочим поясков валка или заклинивания трубы между оправкой и проводкой. При продольном перемещении труба вращается вокруг проводки и оправки со скоростью обкатки её валками. Весь инструмент перемещается навстречу заготовке с равномерной подачей, выбираемой из установленного угла подачи. Трубная заготовка закрепляется с двух сторон в поперечном направлении без натяга.

При построении модели процесса обкатки труб принимаются следующие допущения:

- ввиду малости деформаций и отсутствия обжатия трубы по толщине стенки валки, оправка и проводка принимаются абсолютно жёсткими объектами;
- также в связи с вышеизложенным заготовка рассматривается как упруго-пластичное тело;
- учёт изменения тепловых полей внутри заготовки отсутствует;
- теплопередача между объектами расчётной схемы, а также между объектами и окружающей средой отсутствует.

Конечные элементы (КЭ), существующие для описания предметной области в объёмной постановке, представляют собой элементарные многогранники, выбор которых осуществляется из условий доступности в программном пакете, сложности разбиения геометрии, объёма вычислений и требований по точности получаемых решений. Наиболее универсальными и простыми с точки зрения математического описания среди них являются КЭ в виде параллелепипеда и тетраэдра. Последний выбирается для предполагаемых условий моделирования, так как кривизна полученной геометрии трубы при наличии концевых дефектов эффективно описывается именно этим видом КЭ.

Сетка конечных элементов для трубной заготовки была получена из решения задачи предыдущей операции (раскатки полой гильзы на автоматическом стане в два прохода). Для описания концевого дефекта («плавников») КЭ в местах наибольшего их проявления применено сгущение

сетки. Отметим, что так называемые «плавники» сформированы, как единый объем материала, без разделения их внутри за счёт природы их происхождения.

На рисунке 2.2 изображено положение заготовки и обкатного инструмента.

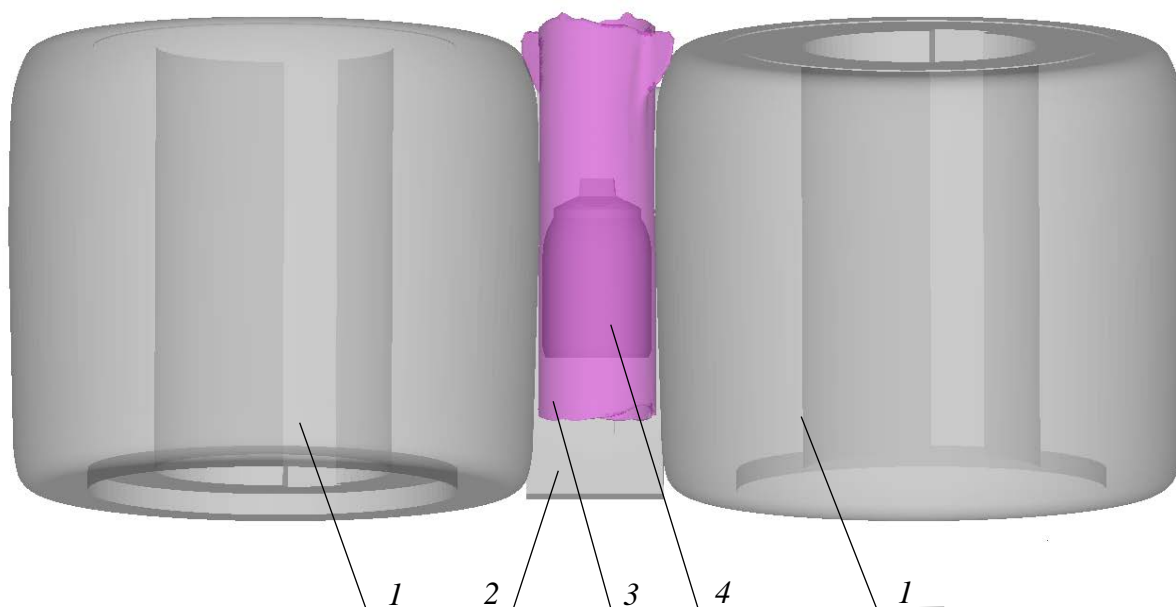


Рисунок 2.2 – Геометрическое положение инструмента и обкатываемой трубы: 1 – валок; 2 – направляющая проводка; 3 – труба; 4 – оправка (расположена внутри трубы по оси)

В случае решения задачи по нахождению энергосиловых параметров и параметров формоизменения при процессе обкатки с использованием МКЭ необходимо определить поле возможных скоростей, для которых будут выполняться принципы совместности и несжимаемости [77].

2.3. Определение параметров граничных условий процесса поперечно-винтовой прокатки труб

В векторной форме множество скоростей в узловых точках однозначно определяется как

$$\mathbf{V}^T = \{\vartheta_1, \vartheta_2, \dots, \vartheta_N\}, \quad (2.1)$$

где T – индекс, обозначающий транспонирование;

N – произведение общего числа узлов на число степеней свободы, приходящееся на один узел.

Поле допустимых скоростей должно согласовываться с граничными условиями на поверхности S_u . В МКЭ интерполяция скалярной функции, значения которой определяется внутри элемента, представлена в следующем виде:

$$f(x, y, z) = \sum_i q_i(x, y, z) \cdot f_i, \quad (2.2)$$

где f_i – значение функции в i -ом узле;

$q_i(x, y, z)$ – функция формы, в общем случае, полином от x, y и z ,

Внутри элемента функция формы:

$$q_i(x_0, y_0, z_0) = \delta_{i0}, \quad (2.3)$$

где (x_0, y_0, z_0) – координаты нулевого узла;

δ_{i0} – символ Кронекера

Для реализации расчётной схемы на базе конечно-элементной формулировки с применением вариационных принципов используем основное уравнение вида [48] [77]:

$$\int_V \sigma_{ij} \delta \xi_{ij} dV - \int_{S_F} F_i \delta u_i dS = 0 \quad (2.4)$$

где σ_{ij} – тензор напряжений;

F_i – усилие, действующее на поверхности;

V – объём области;

S – поверхность области;

S_F – поверхность, на которую действуют усилия;

δu_i – произвольная вариация допустимой скорости перемещения;

$\delta \xi_{ij}$ – вариация тензора скоростей деформаций

в зависимости от δu_i .

Для решения уравнения (2.4) требуется задание граничных условий. Смешанные граничные условия задаются в связи со сложностью задания граничных условий одного из видов на поверхностях всех объектов расчётной

схемы [77]. Для задания граничных условий определяем поверхности с заданными перемещениями, поверхности, на которой действуют усилия, и поверхности контакта между объектами расчётной схемы (ведущим и ведомым).

Так как перемещения инструмента на контактной поверхности определены движением инструмента, следует ограничиться заданием закона действия сил внешнего трения в напряжениях. При этом напряжения на поверхности свободного течения металла отсутствуют.

Максимальная величина касательных напряжений, действующих на границе контакта с металлом, не может превышать предела текучести материала на сдвиг [65]. Этому условию удовлетворяет уравнение Зибеля для определения сил трения. Закон действия сил внешнего трения на поверхности контакта инструмента с металлом задаём в виде

$$\tau = \psi \tau_S \quad (2.5)$$

где τ – касательное напряжение;

τ_S – предел текучести материала при сдвиге;

ψ – показатель трения по Зибелю; $\psi = 0 \dots 1$.

Так как материал заготовки имеет упругие и пластические свойства необходимо также сформулировать критерий пластичности. Для упругого участка диаграммы задаётся линейная модель согласно обобщённому закону Гука:

$$\boldsymbol{\varepsilon} = \mathbf{C} \boldsymbol{\sigma} \quad (2.6)$$

где $\boldsymbol{\varepsilon}$ – матрица деформаций;

$\boldsymbol{\sigma}$ – матрица напряжений;

\mathbf{C} – матрица упругой податливости элемента:

$$\mathbf{C} = \frac{1}{E} \begin{bmatrix} 1 & -\nu & -\nu & 0 & 0 & 0 \\ -\nu & 1 & -\nu & 0 & 0 & 0 \\ -\nu & -\nu & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 2(1+\nu) & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 2(1+\nu) & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 2(1+\nu) \end{bmatrix} \quad (2.7)$$

E – модуль упругости материала;

ν – коэффициент Пуассона.

Модуль упругости материала задаётся как функция от температуры, что является принципиальным фактором для горячей деформации.

Пластическая деформация характеризуется единой нелинейной кривой упрочнения, при которой интенсивность напряжения (сопротивление деформации σ_s) приравнивается напряжению одноосного растяжения (сжатия) материала в условиях развитой пластической деформации. Сопротивление деформации при одноосном нагружении задаётся как функция нескольких параметров, характеризующих описываемый физический процесс, с коэффициентами, выведенными экспериментально для каждого материала.

При моделировании процесса обкатки труб в горячем состоянии для задания предела текучести материала (механической характеристики материала, характеризующей напряжение, при котором пластические деформации продолжают расти без увеличения нагрузки) требуется учитывать интенсивность деформаций, а также интенсивность скоростей деформации и температуру [65]:

$$\sigma_s = \frac{a_1 a_2 a_3 \Lambda^{m_2} H^{m_3}}{e^{m_1 \theta}} \sigma_{0,2} \quad (2.8)$$

где θ – температура материала;

H – интенсивность скоростей деформации сдвига

Λ – суммарная степень деформации (сдвига)

$\sigma_{0,2}$ – условный предел текучести (напряжение, которому соответствует пластическая деформация 0,2%)

$$H = \sqrt{2} \{ \xi_{ij} \xi_{ij} \}^{1/2} \quad (2.9)$$

где ξ_{ij} – тензор скоростей деформации;

$a_1, a_2, a_3, m_1, m_2, m_3$ – постоянные коэффициенты, зависящие от материала.

Условием перехода от упругих деформаций к пластическим является условие Губера-Мизеса [78], при котором интенсивность касательных напряжений достигает предела текучести материала на сдвиг:

$$T = \sigma_T / \sqrt{3} = \tau_S \quad (2.10)$$

где τ_S – предел текучести при чистом сдвиге.

Для упругопластического тела также немаловажным является задание поведения при разгрузке (уменьшения внешних усилий после достижения предела текучести). Если элемент тела находится в пластическом состоянии, а напряжения в его окрестности равны σ_i , при сообщении последним бесконечно малых приращений $d\sigma_i$, т.е при догрузении рассматриваемого элемента, возможны следующие случаи [79]:

1. Вектор $d\vec{\sigma}$ направлен внутрь элемента тела. Догрузка приводит к упругой деформации (разгрузке). В этом случае приращение напряжений связаны с приращениями деформаций законов Гука и изменения пластических деформаций не происходит.

2. Вектор $d\vec{\sigma}$ направлен по касательной к поверхности нагружения (нейтральное нагружение). Как и в предыдущем случае, приращения пластических деформаций равно нулю, поверхность элемента тела не изменяется. Приращения напряжений и деформаций связаны с законом Гука.

3. Вектор $d\vec{\sigma}$ направлен наружу по отношению к поверхности нагружения. Имеет место активное нагружение, приращение пластических деформаций отлично от нуля.

Таким образом, с точки зрения теории малых линейных деформаций для упруго-пластичного тела справедливы три состояния в зависимости от достижения критерия пластичности и мгновенного приращения напряжений:

$$\sigma_i = \begin{cases} E\varepsilon, \varepsilon \leq \varepsilon_T \\ E\varepsilon_T + E_k(\varepsilon - \varepsilon_T), \varepsilon > \varepsilon_T, \frac{d\sigma_i}{dt} \geq 0 \\ E_k(\varepsilon - \varepsilon_T) - E\varepsilon, \varepsilon > \varepsilon_T, \frac{d\sigma_i}{dt} < 0 \end{cases} \quad (2.11)$$

где E_k – модуль упругости 2-го рода.

При переходе к большим деформациям траекторию движения частицы делят на прямолинейные участки, соответствующие малым деформациям Γ_i .

После их вычисления на каждом участке, определяют суммарную степень деформации (сдвига)

$$A = \sum \Gamma_i \quad (2.12)$$

Расчёт остаточных напряжений выполняется с помощью теоремы о разгрузке: в пластически деформированном теле после снятия нагрузки, надо к напряжениям, которые имелись в теле при пластической деформации перед разгрузкой, прибавить в алгебраическом смысле напряжения противоположного знака упругих свойств тела: [48]

$$\begin{cases} \sigma_{cp} = 3K\varepsilon_{cp} + (\sigma_{cp}^* - 3K\sigma_{cp}^*) \\ \sigma_i - \sigma_{cp} = 2G(\varepsilon_i - \varepsilon_{cp}) + [(\sigma_i^* - \sigma_{cp}^*) - 2G(\varepsilon_i^* - \varepsilon_{cp}^*)] \\ \tau_{ij} = G\gamma_{ij} + (\gamma_{ij}^* - G\gamma_{cp}^*) \end{cases} \quad (2.13)$$

где σ_{cp} – среднее напряжение;

$K = \frac{E}{3(1-2\mu)}$ – модуль объёмной деформации материала;

$G = \frac{E}{2(1+\mu)}$ – модуль сдвига;

σ_i^* , ε_i^* , γ_{ij}^* – компоненты тензора напряжений и деформаций, соответствующие абсолютно пластичному телу.

Уравнение 2.4, записанное для каждого КЭ, после преобразования приводится к системе линейных уравнений, записанных в матричной форме [80]:

$$\mathbf{K} = \mathbf{B}^T \mathbf{D} \mathbf{B} V_e \quad (2.14)$$

где V_e – объем элементарного тетраэдра

\mathbf{D} – матрица свойств материала; для изотропных материалов:

$$\mathbf{D} = \frac{E}{(1+\nu)(1-2\nu)} \begin{bmatrix} 1-\nu & \nu & \nu & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1-\nu & \nu & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1-\nu & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \frac{1-\nu}{2} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1-\nu}{2} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1-\nu}{2} \end{bmatrix} \quad (2.15)$$

В общем случае матрица \mathbf{B} определяется:

$$\mathbf{B} = \mathbf{S}\mathbf{N} \quad (2.16)$$

где \mathbf{S} – матрица дифференцирования

\mathbf{N} – функция формы КЭ, выраженные в матричной форме.

Для КЭ в виде тетраэдра:

$$\mathbf{B} = \begin{bmatrix} \frac{\partial q_i}{\partial x} & 0 & 0 \\ 0 & \frac{\partial q_i}{\partial y} & 0 \\ 0 & 0 & \frac{\partial q_i}{\partial z} \\ \frac{\partial q_i}{\partial y} & \frac{\partial q_i}{\partial x} & 0 \\ 0 & \frac{\partial q_i}{\partial z} & \frac{\partial q_i}{\partial y} \\ \frac{\partial q_i}{\partial z} & 0 & \frac{\partial q_i}{\partial x} \end{bmatrix} \quad (2.17)$$

Усилия в узлах КЭ от первоначальных деформаций находятся по формуле:

$$\mathbf{f} = -\mathbf{B}^T \mathbf{D} \varepsilon_0 \mathbf{V}_e \quad (2.18)$$

где ε_0 – степень объемного сжатия КЭ.

Выражая матрицы жесткости (2.17) для каждого элемента заготовки и суммируя их, получаем систему совместных линейных уравнений [77]

$$\mathbf{K} \Delta \mathbf{v} = \mathbf{f} \quad (2.19)$$

где $\Delta \mathbf{v}$ – величина изменения скорости в узлах.

Для задач ОМД уравнение жёсткости (2.14) нелинейно и решается с помощью метода итераций Ньютона-Рафсона [77]. Сущность метода состоит в линеаризации и применении критерия сходимости для нахождения окончательного решения. В этом случае для нахождения решения принятая скорость v_0 увеличивается до величины v'_0 на каждом шаге расчета.

$$v'_0 = v_0 + \alpha \Delta v \quad (2.20)$$

где α – коэффициент понижения, $\alpha=0\dots 1$.

Сходимость метода Ньютона-Рафсона обеспечивается тем, что величина принятой скорости v_0 попадает в область допустимых значений, удовлетворяющих решению задачи. При данном условии метод Ньютона-

Рафсона требует относительно меньшего количества итераций, чем прочие. Сходимость метода состоит в том, что $(n+1)$ -ое приближение, определяющееся по формуле

$$x_{n+1} = x_n - \frac{F(x_n)}{F'(x_n)} \quad (2.21)$$

удовлетворяет условию

$$\left| \frac{x_{n+1} - x_n}{x_n} \right| \leq \Delta \quad (2.22)$$

где Δ – заданная точность решения.

Метод Ньютона-Рафсона обеспечивает достижение необходимой сходимости решения при малом числе итераций. В отдельных случаях, когда трудно обеспечить сходимость решения, применяют метод простой итерации (метод последовательных приближений), суть которого состоит в приведении уравнения вида $F(x) = 0$ к эквивалентному уравнению $x = F(x)$. При этом, поиск решения на каждом шаге расчета осуществляют согласно выражению $x_{n+1} = F(x_n)$. Процесс нахождения решения считается завершенным при условии, что

$$|x_{n+1} - x_n| \leq \Delta \quad (2.23)$$

Для нахождения исходной скорости v_0 применяется другой метод решения нелинейных уравнений – метод прямой итерации. Данный метод основан на следующих допущениях:

- для каждой итерации (при отсутствии теплообмена) состояния приравнивается к линейной зависимости:

$$\sigma = \sqrt{\frac{3}{2}(S_{ij}S_{ij})} = \sigma(\varepsilon, H) \quad (2.24)$$

где σ – среднее напряжение;

S_{ij} – девиатор напряжений.

- постоянство отношения интенсивности касательных напряжений к интенсивности скоростей деформации сдвига:

$$\frac{\sigma}{H} = const \quad (2.25)$$

2.4. Выводы по главе 2

1. На основании МКЭ в программном комплексе твердотельного моделирования разработана математическая модель процесса обкатки труб трубопрокатной установки с автоматическим станом, которая имеет широкие возможности по заданию скоростных показателей процесса, а также геометрии исследуемых объектов.

2. Разработан алгоритм определения напряжённо-деформированного состояния металла в очаге деформации и нагружения прокатного инструмента при обкатке стальных бесшовных труб на обкатных машинах трубопрокатных установок с автоматическим станом, который позволяет находить формоизменение труб, поля распределения напряжений, скоростей и деформаций металла в очаге деформации, определять энергосиловые параметры, что позволит оценить возможности проведения процесса обкатки для различных категорий прочности и типоразмеров труб.

ГЛАВА 3. ПАРАМЕТРИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ ПРОЦЕССА ПОПЕРЕЧНО-ВИНТОВОЙ ПРОКАТКИ ТРУБ НА ОБКАТНЫХ СТАНАХ

3.1. Алгоритм решения задачи определения параметров НДС очага деформации поперечно-винтовой прокатки при обкатке горячедеформированных труб в агрегате ТПА

В настоящее время для анализа процессов ОМД наибольшее развитие получают математические модели, основанные на МКЭ, к которым относится программный комплекс DEFORM-3D. Система DEFORM предоставляет широкие возможности для решения задач определения напряжений, деформаций, параметров формоизменения, энергосиловых параметров, а также обработки результатов, оценки процесса на наличие дефектов, анализа течения материала. Результаты включают в себя численные данные для полей перемещений, скоростей и температур, а также компоненты тензоров напряжений, деформаций и скоростей деформаций. На основании рассчитанных данных становится возможно определить поверхностные и объёмные интенсивности сил, действующие на объекты расчётной схемы процесса. Эти данные отображаются в виде графических и табличных значений, находящихся дискретно с определенным интервалом расчёта. [81].

Моделирование процесса обкатки трубной заготовки в DEFORM-3D состоит из четырёх основных этапов [82]:

- Импорт исходных данных по геометрии заготовки, напряженно-деформированному и температурному состоянию на поверхности и внутри заготовки.
- Создание геометрии объектов (валки, оправка, проводка) в стороннем программном комплексе, и их последующее экспортирование в виде каркасной модели (формат *.stl).
- Работа в программном модуле PreProcessor (препроцессор) – позиционирование объектов, наложение начальных и граничных условий,

разбиение области решения задания на КЭ, выбор параметров решателя, необходимых для выполнения расчёта.

- Решение системы уравнений, описывающих задачу, за реализацию которого отвечает модуль Simulator (Процессор).
- Анализ полученных расчетных данных в модуле PostProcessor (Поспроцессор).

На первом этапе формируется среда решения задачи, в которой задаётся геометрическое отображение расчётной схемы, а также исходные данные для дальнейшего задания и параметры окружающей среды, позволяющие воспроизводить физические условия моделируемого процесса.

Далее происходит компоновка схемы процесса обкатки трубной заготовки. В программном комплексе создаются объекты, отражающие свойства трубной заготовки валков, оправки и проводкового инструмента. Для заготовки принимаются физико-механические параметры, определяющие её как упругопластическое объект: т.е. как совокупность физических уравнений упругого и пластического состояния с критерием пластичности Губера-Мизеса. Упругопластическая модель свойств заготовки принимается ввиду относительно малого размера очага деформации и небольших обжатий, требуемых в основном для исправления геометрии и надёжного удержания заготовки на оправке. Проводка, оправка и валки задаются как абсолютно жёсткие объекты.

Геометрия инструментов и оснастки создаётся в программном комплексе SolidWorks и импортируется в виде предварительно созданных каркасных объектов (*.stl). Отметим, что геометрия трубной заготовки импортируется в виде сетки КЭ из решения предыдущей задачи по прокатке заготовки на автоматстане (*.key).

При создании сетки КЭ при необходимости есть возможность задать дополнительные окна сгущения КЭ меньшего размера, чем размер в остальном объёме сетки при лимитированном количестве КЭ для создаваемого объекта. Импортируемая сетка КЭ содержит данные о компонентах напряжений и деформаций, рассчитанных для предыдущей операции производства

горячекатаной трубы, что позволяет учесть их в качестве начальных условий задачи для более корректного последующего решения.

При разбиении объекта на КЭ может возникнуть ситуация, при которой потребуется включение механизма создания адаптивных сеток с применением интерполяции. Для этого используется параметр компенсации объёма, который активируется при непосредственном решении задачи с целью не допустить вырождение КЭ сетки при высокой степени деформации или сложной геометрии профилирования заготовки, а также это значительно снижает погрешность расчёта.

Каждому объекту присваиваются закон его движения и устанавливаются граничные условия в виде распределения усилий или перемещений на внеконтактных поверхностях. Далее генерируется характер взаимодействия между объектами. В случае обкатки трубной заготовки создаётся взаимодействие между парами «оправка-заготовка», «правый валок-заготовка», «левый валок-заготовка» и «проводка-заготовка». Для определения взаимодействия необходимо задать три параметра: характер взаимодействия объектов (определить главный объект и подчинённый), закон трения (в случае обкатки трение задаётся как зависимость от сдвиговых напряжений) и показатель трения, критерий разделения объектов при взаимном перемещении в процессе деформации.

После задания геометрии расчётной схемы и назначения объектам закона их перемещения, а также взаимодействия между ними определяются параметры моделирования: число шагов расчёта, интервал между ними и установление периодичности сохранения данных. Также на данном этапе задаются величины, необходимые для реализации автоматизированного корректирования шага расчёта [83].

Следующим шагом выбирается метод решения обобщённого уравнения жёсткости. Как указано в предыдущей главе в качестве метода решения выбирается метод Ньютона-Рафсона, при котором за отправную точку расчёта принимается решение, полученное методом прямой итерации [83].

Когда в препроцессоре выполнены все предварительные условия для начала расчёта, начинается процесс создания файла базы данных, который будет уже использоваться в программе Simulator (Процессор) [82]. Процессор записывает в файл базы данных каждый шаг моделирования.

На данном этапе производится решение основных уравнений МКЭ и запись полученных данных расчёта в исходную базу данных. Алгоритм решения состоит из последовательных операций определения номер шага расчёта, решения системы обобщённых уравнений жёсткости сначала прямым, а далее итерационным методом Ньютона-Рафсона.

Итерации продолжаются до получения заданной сходимости решения, после чего происходит переход к следующему шагу расчёта до окончания количества заданных шагов. Полученные результаты расчёта сохраняются в исходную базу данных с учётом выбранной периодичности. Приведённый алгоритм решения задачи реализуется на каждом из шагов до заданного в Препроцессоре окончательного шага моделирования (принятого по лимитам перемещений главного инструмента или времени, отведённого на процесс).

Для отображения результатов проведённого расчёта служит постпроцессор, который используется для анализа результатов, полученных после выполненных расчётов в Процессоре. Инструментарий постпроцессора позволяет наблюдать за изменениями, происходящими в заготовке, а также анализировать НДС и энергосиловые параметры процесса. Данные выводятся графически в виде поверхностных и объёмных эпюр и гистограмм распределения величин по узлам КЭ, графиков изменения параметров процесса во времени путём представления массивов данных и график изменения параметров в отдельных узлах сетки КЭ на протяжении процесса обкатки путём отслеживания узловых точек объекте. Для дальнейшей интерпретации массивы данных в полном объёме или для некоторой выборки фиксированных значений могут быть импортированы в формате файлов *.txt.

3.2. Исходные данные для расчётной схемы и диапазон изменения параметров

Основные параметры и режимы технологического процесса выбирались исходя из рекомендаций ведения процесса обкатки черновых труб после автоматического стана для условий реального производства. Выбранные для расчёта размеры труб, а также характерные размеры для обкатного инструмента представлены в таблице 3.1.

Таблица 3.1. – Исходные параметры для моделирования

Размер готовой трубы	Размер гильзы	Калибр	Диаметр оправки	Сопротивление деформации σ_s , МПа	Степень деформации, ε
159×4,5	170×10	157	150	61,7-87,4	0,013
159×5	170×11		149		
159×5,5	169×12		146		
159×7	169×13		145		
159×7,5	168×14		144		
168×5	179×10	167	159	61,5-87,2	0,012
168×5,5	178×11		158		
168×6	178×12		157		
168×7	178×13		155		
168×8	177×14		153		
194×6	206×10	193	183	61,1-86,6	0,01
194×6,5	205×11		182		
194×7	205×12		181		
194×8	205×13		179		
194×9	204×14		177		
219×6	233×12	216	206	60,8-86,3	0,009
219×7	232×13		204		
219×8	232×14		202		
219×9	231×15		200		
219×10	231×16		198		
245×7	258×12	244	228	60,6-85,9	0,008
245×8	257×13		226		
245×9	257×14		224		
245×10	256×15		222		
245×12	256×16		218		

Для численного эксперимента создавались геометрические объекты на основе инструмента, используемого в реальном производстве на обкатной машине ТПА-220 цеха №1 АО «ПНТЗ». В качестве инструмента используются два бочкообразных валка, оправка и проводка. Размеры валков являются постоянными независимо от размера прокатываемых труб, схема прокатного валка представлена на рисунке 3.1.

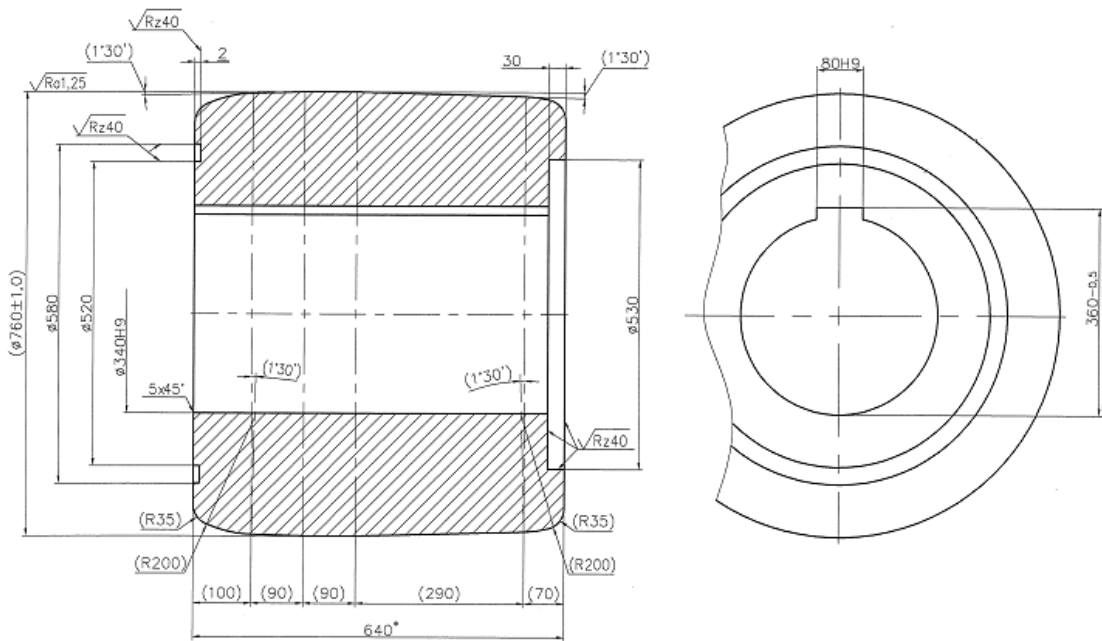


Рисунок 3.1 – Схема валка обкатной машины

Оправка выбирается и устанавливается в зависимости от типоразмера черновой трубы, согласно технологии производства, принятой на данном предприятии. Геометрия оправки представлена на рисунке 3.2.

Аналогично на рисунке 3.3. показана геометрия и размеры нижней проводки, установленной при обкатке трубы.

В качестве исходной геометрии черновой трубы импортируется геометрия, полученная при численном эксперименте по двухоперационной прокатке в автоматическом стане с искажением заднего конца в виде продольного «плавника».

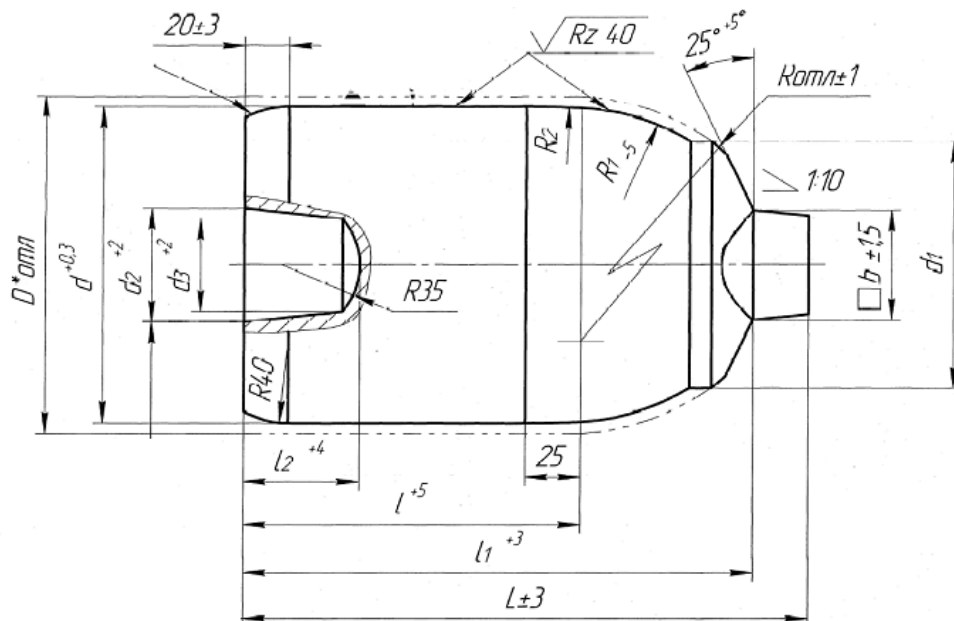


Рисунок 3.2 – Схема оправки обкатной машины

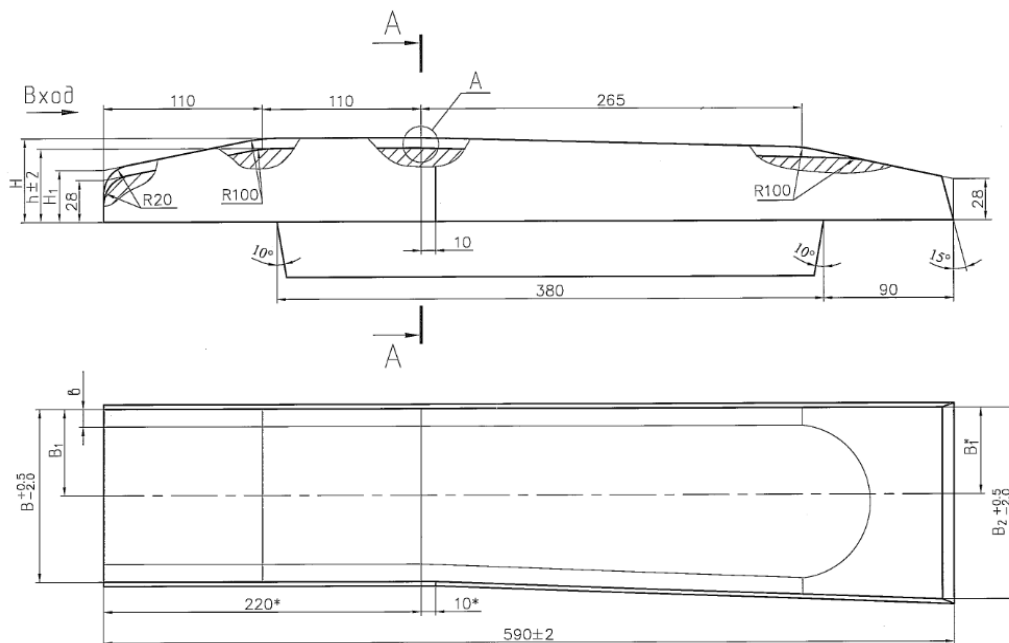


Рисунок 3.3 – Схема проводки

КЭ сетка описывает как данный дефект, так и отклонение трубы от круглости и разнотолщинность стенки трубы за счёт наличия выпусков в калибре валков автоматстана. Типовая сетка КЭ трубной заготовки представлена на рисунке 3.4. Продольный «плавник» при этом считается сплошным объёмом без разделительных внутренних поверхностей, несмотря на особенности его возникновения.



Рисунок 3.4 – Типовая сетка КЭ трубной заготовки

Процесс обкатки происходит при температуре трубной заготовки от 850 °С до 1100 °С. При постановке расчёта использован материал Сталь 45 (аналог AISI-1045) [25], для задания свойств материала которого использовались аналитические зависимости, задаваемые в табличной форме. Область упругих свойств задана модулем продольной упругости и коэффициентом Пуассона (коэффициентом поперечной деформации), принятым 0,3.

Модуль упругости определяется с помощью справочных данных, которые [25] вносятся в виде конечных значений, полученных для определенных температур. График зависимости модуля упругости от температуры представлен на рисунке 3.5. Промежуточные значения в указанном диапазоне температур находятся интерполяцией данных первого порядка.

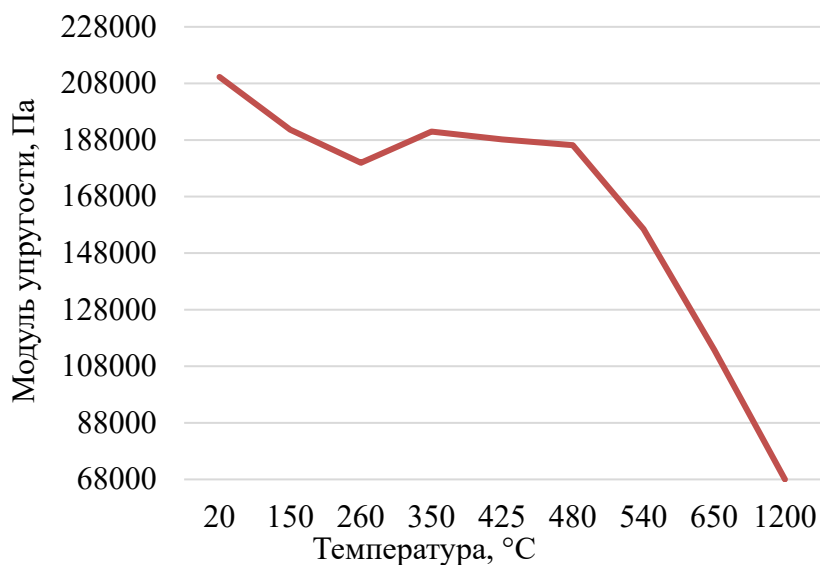


Рисунок 3.5 – Зависимость модуля упругости от температуры

Зона пластических деформаций задаётся зависимостью сопротивления деформации от значений степени деформации, скорости и температуры и выводится в виде графика на основе справочных или импортированных табличных данных. Примеры зависимостей сопротивления деформации для некоторых значений температур от степени деформации для материала Сталь 45 представлены на рисунке 3.6-3.8.

Коэффициент трения между заготовкой и валками принят равным 0,5, между заготовкой и оправкой, заготовкой и проводкой коэффициент трения равен 0,2 [84]. Расчёт каждого типоразмера трубы вёлся при нескольких значениях скорости подачи трубной заготовки в валки с коэффициентом осевого скольжения 0,5...1. Скорость обкатки (вращения) валков при расчёте была принята $0,5 \text{ с}^{-1}$, угол установки валков с подачей $7,5^\circ$.

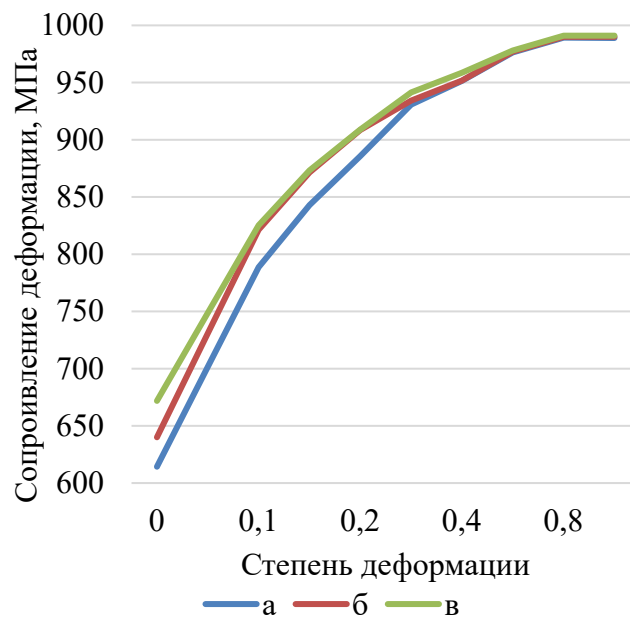


Рисунок 3.6 – График зависимости сопротивления деформации от степени деформации при температуре $20 \text{ }^\circ\text{C}$: а – при скорости деформации $1,6 \text{ с}^{-1}$; б – при скорости деформации 8 с^{-1} ; в – при скорости деформации 40 с^{-1}

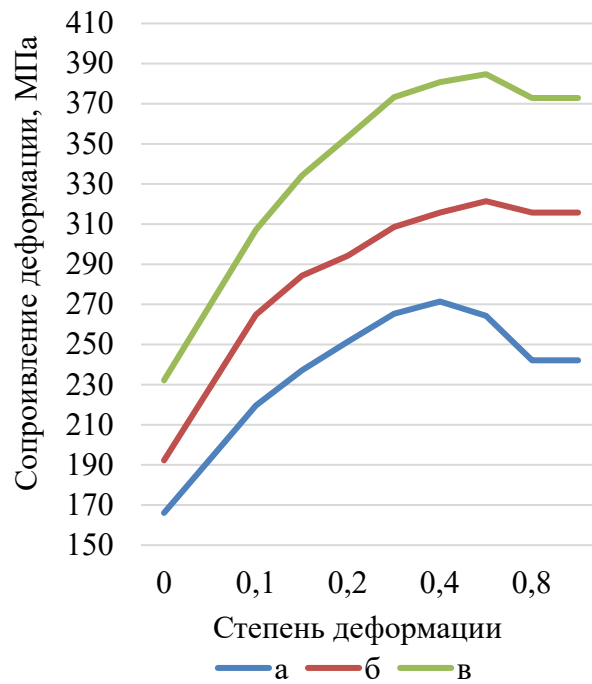


Рисунок 3.7– График зависимости сопротивления деформации от степени деформации при температуре 800 °С: а – при скорости деформации 1,6 с⁻¹; б – при скорости деформации 8 с⁻¹; в – при скорости деформации 40 с⁻¹

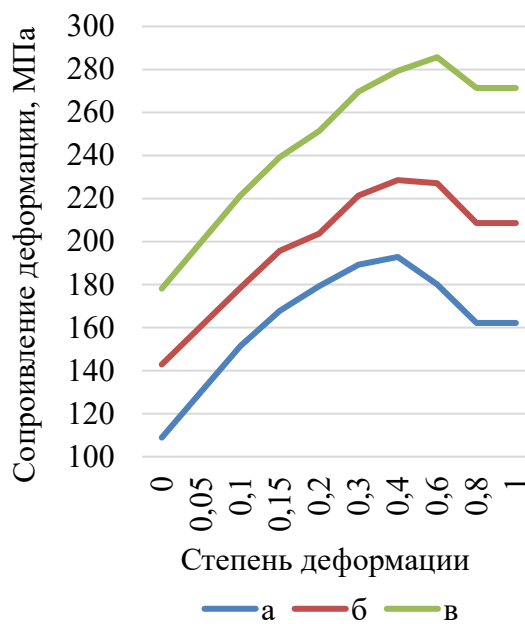


Рисунок 3.8 – График зависимости сопротивления деформации от степени деформации при температуре 900 °С: а – при скорости деформации 1,6 с⁻¹; б – при скорости деформации 8 с⁻¹; в – при скорости деформации 40 с⁻¹

3.3. Результаты параметрического анализа процесса обкатки горячедеформированных труб

Рассмотрим особенности течения процесса обкатки для некоторых частных случаев, характеризующих соотношение «диаметр-толщина стенки» на всем диапазоне типоразмеров тонкостенных труб с учётом актуальности реального выпуска данных типоразмеров на производстве. В качестве примера возьмём промежуточный размер для диапазона выпускаемых труб на ТПА-220 $D = 168$ мм.

Особенностями геометрии труб для каждого случая является наличие разностенности исходной трубы, вызванные выпусками калибра автоматстана, а также продольных дефектов. Раскатка местных утолщений стенки, а также попадание в очаг деформации продольных складок различных для разных сечений линейных размеров и, таким образом, взаимодействие между ними и прокатным инструментом при обкатывании трубы, сопровождается различным характером изменения энергосиловых параметров.

На рисунках 3.9–3.14 представлены графики изменения усилий прокатки, осевых усилий и моментов прокатки. Как видно из графиков значения энергосиловых параметров не являются постоянными. Они изменяются в процессе поперечно-винтовой прокатки за счёт кривизны заготовки (изменения геометрии очага деформации), получаемой после автоматического стана. В отдельные моменты времени значения приближаются к нулю, что говорит об уменьшении контакта между заготовкой и валками.

В этом случае заготовка проскальзывает в осевом направлении, что в реальных условиях приведёт к прекращению её продольного перемещения и её заклиниванию вместе с оправкой. Для оценки параметров при данной ситуации график моментов прокатки приведён для двух случаев: обкатку трубы валками на вращающейся вокруг своей оси вместе с трубой оправке и обкатка с зафиксированной во всех степенях свободы оправкой.

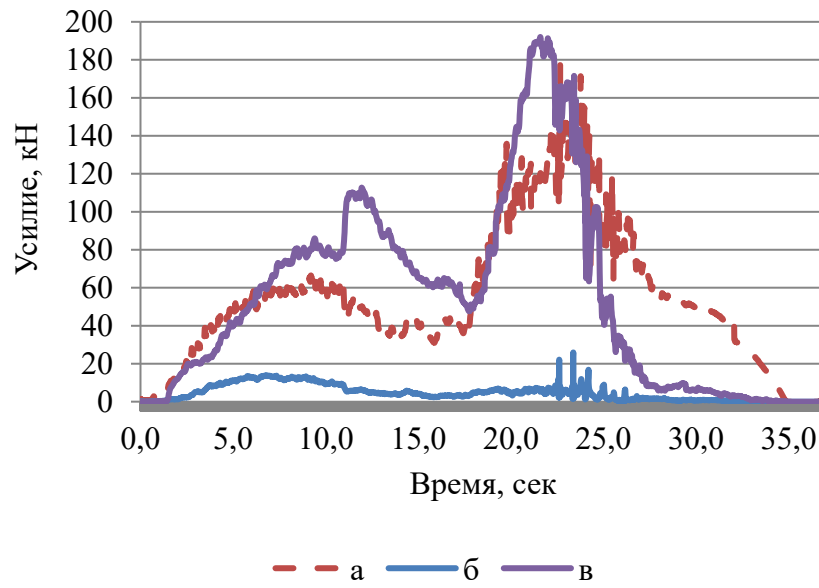


Рисунок 3.9 – График изменения усилия прокатки (а), усилия на толкателе (б) и осевого усилия (в) при обкатке трубы 168×5

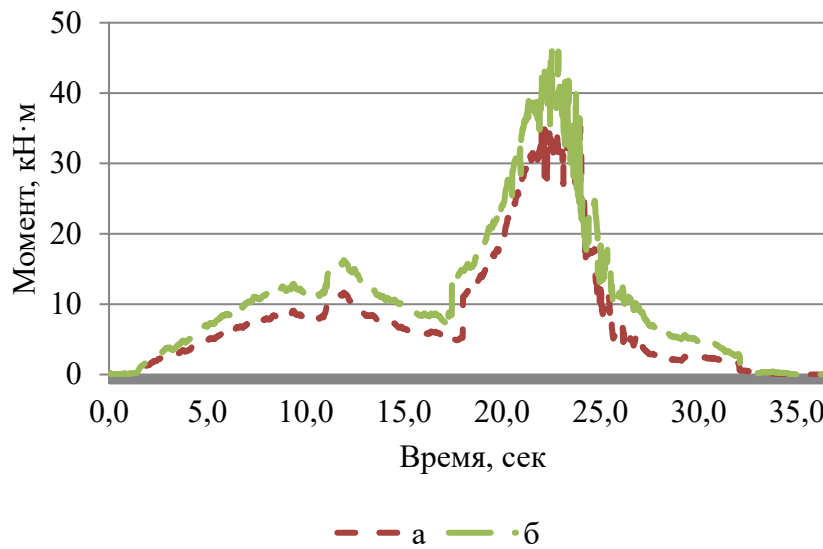


Рисунок 3.10 – График изменения момента (а) и момента при заклинивании (б) при обкатке трубы 168×5

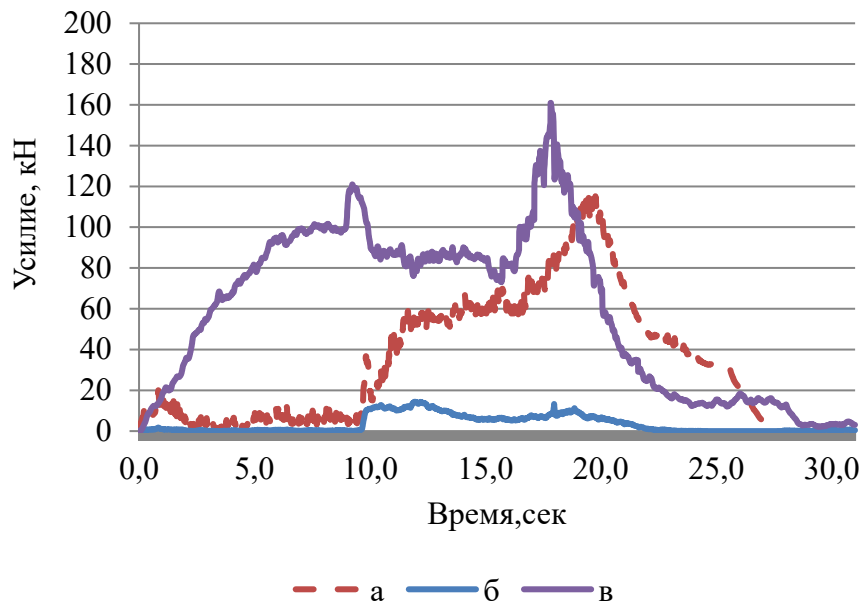


Рисунок 3.11 – График изменения усилия прокатки (а), усилия на толкателе (б) и осевого усилия (в) при обкатке трубы 168×6

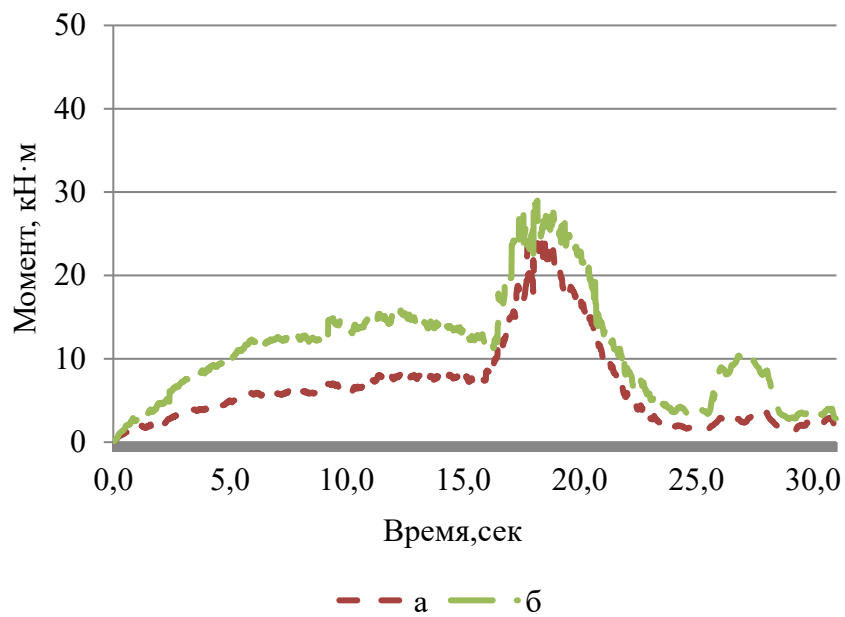


Рисунок 3.12 – График изменения момента (а) и момента при заклинивании (б) при обкатке трубы 168×6

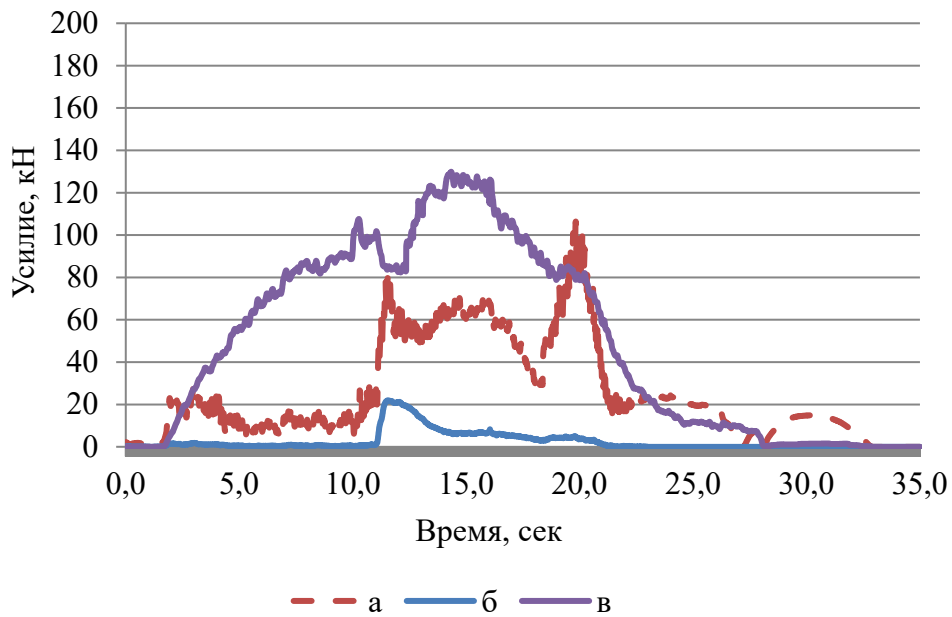


Рисунок 3.13 – График изменения усилия прокатки (а), усилия на толкателе (б) и осевого усилия (в) при обкатке трубы 168×8

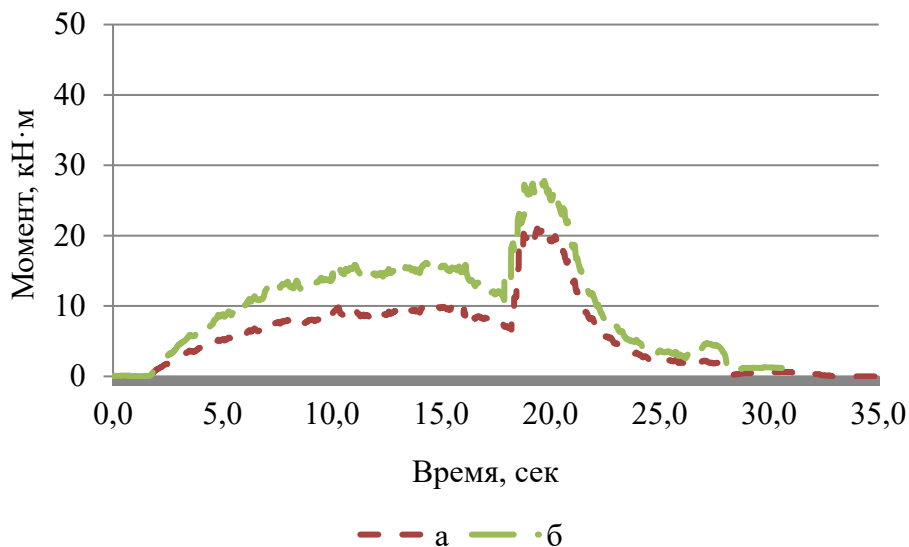


Рисунок 3.14 – График изменения момента (а) и момента при заклинивании (б) при обкатке трубы 168×8

3.3.1. Анализ основных стадий процесса обкатки

Рассмотрим основные стадии процесса: захват трубы валками, стационарная стадия обкатки и раскатка продольных дефектов при выходе трубы из рабочей клетки. Как видно из графиков, усилия на валках и оправке представляют собой монотонную зависимость с постепенным возрастанием по

мере перемещения заготовки. Как видно из рисунка 3.15, точки контакта группируются для валков на входном конусе, обеспечивая захват заготовки для дальнейшей обкатки. Посадка внутренней поверхности трубы на конус оправки осуществляется равномерно в виде пояса равной ширины.

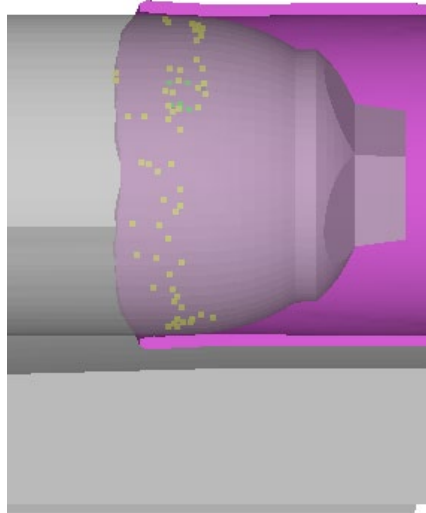
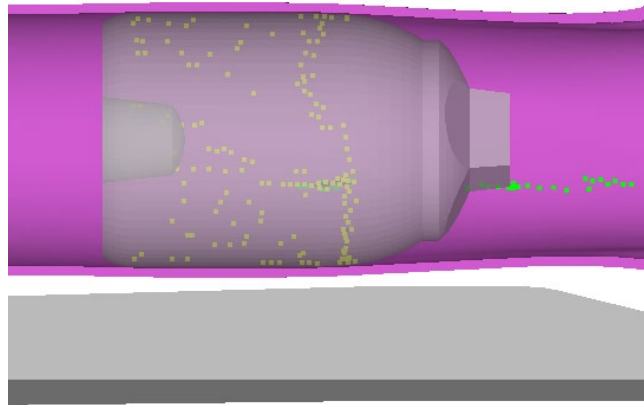
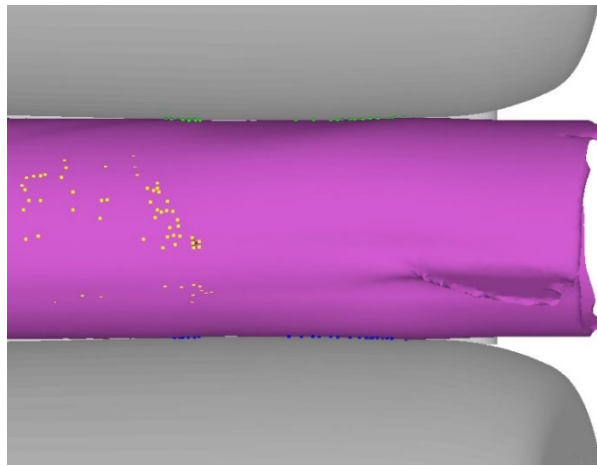


Рисунок 3.15 – Первоначальный контакт заготовки с инструментом (жёлтые точки – контактные узлы с оправкой; зелёные точки – контактные узлы с прокатным валком) при $D/S=30$

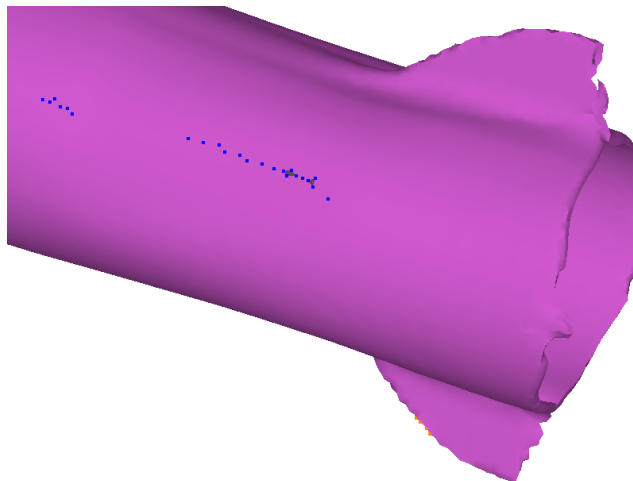
По мере продвижения трубы по оправке ширина охвата разрастается, что сопровождается ростом энергосиловых параметров. Необходимо заметить, что сжатие валками происходит вдоль линии, практически параллельной оси прокатываемой трубы. Линия контакта между валками и заготовкой сдвинута ко входу заготовки в калибр относительно оправки, что приводит к сжатию поперечного сечения трубы и раздаче («подъёму») диаметра трубы вдоль перпендикулярной оси сечения. Оваллизация ведёт к изменению геометрии полей контактов между заготовкой и оправкой, и выражается в перемене характера зависимости осевых усилий. Распределение узлов контакта с прокатным инструментом на заготовке в стационарной стадии обкатки показано на рисунке 3.16.



а



б



в

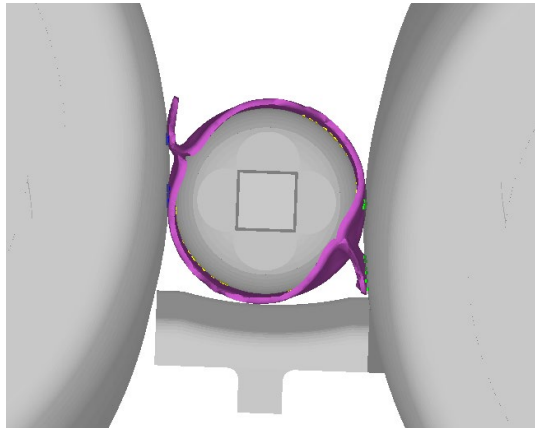
Рисунок 3.16 – Распределение узлов контакта с прокатным инструментом на заготовке в стационарной стадии обкатки (жёлтые точки – контактные узлы с оправкой; зелёные и синие точки – контактные узлы с прокатными валками) для трубы $168 \times 5,5$:
а – в продольном направлении; б – вид сбоку; в – общий вид

При попадании продольного дефекта («плавника») в очаг деформации обкатной машины процесс поперечно-винтовой прокатки совмещается с процессом гибки продольного дефекта. Данное явление возможно при набегании «плавника» на вращающуюся рабочую поверхность по касательной винтовой линии. В противном случае при перемещении трубы дефект натолкнётся на торцевую грань бочки вала или направляющей линейки. В обоих случаях это приводит к смятию кромки продольного дефекта и проскальзыванию трубы в продольном направлении до тех пор, пока за счёт придаваемого ей вращения она не повернётся на угол, достаточный для преодоления препятствия. В связи с изложенным подобные случаи исключены из рассмотрения.

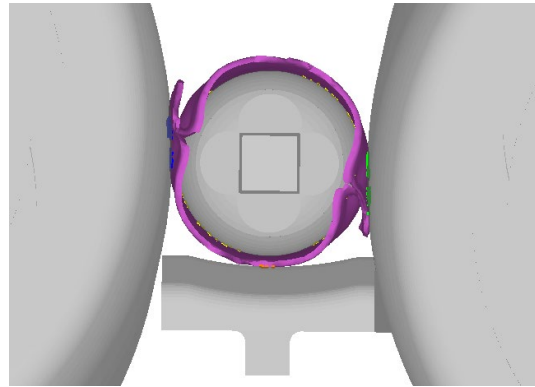
Стадии гибки плавников в калибре обкатной машины представлены на рисунке 3.17. В общем случае вне зависимости от геометрии дефекта и его размеров происходит постепенное складывание плавника вдоль наружной поверхности трубы с увеличением площади соприкосновения заготовки и вала, а также появлением, таким образом, локального утолщения стенки. Поверхность контакта при раскатке продольных задних дефектов в обкатном стане представлена на рисунке 3.18. Все эти факторы должны сопровождаться ростом усилий прокатки.

Отметим, что также обеспечить чисто складывание дефектов невозможно. В большинстве случаев наблюдается неустойчивая ситуация, когда наравне со сгибанием дефекта наблюдается потеря устойчивости поперечного сечения трубы, при котором (вплоть до отсутствия изменений в геометрии дефекта) деформация приобретает характер сдавливания стенок и искажения поперечного сечения (в сторону овала или «восьмёрки»).

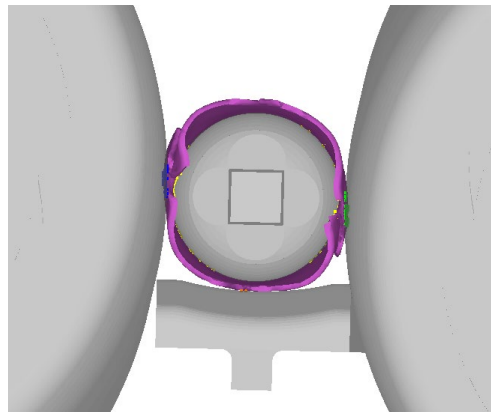
Итогом подобного искажения является увеличение площади контакта между трубой и оправкой и рост осевого усилия, затрачиваемого на исправление геометрии трубы при прохождении через оправку. Посадка трубы на оправку, вызванная потерей устойчивости трубы при раскатке дефекта изображена на рисунке 3.19.



а



б



в

Рисунок 3.17 – Разглаживание концевых дефектов в обкатной машине:
а-в – стадии процесса

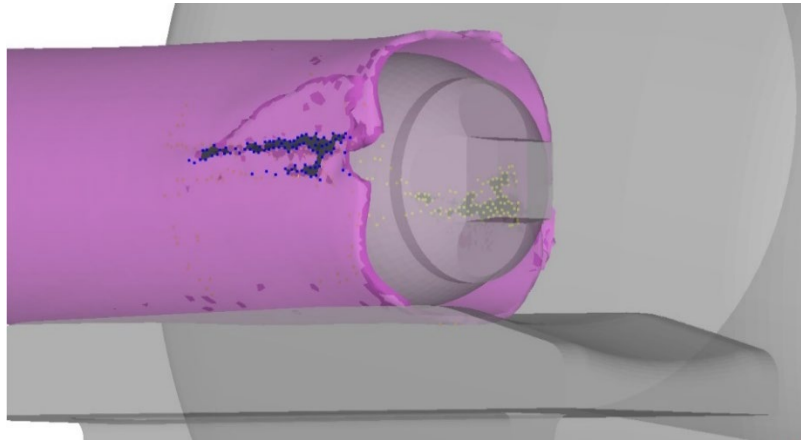


Рисунок 3.18 – Поверхность контакта при раскатке продольных задних дефектов в обкатном стане

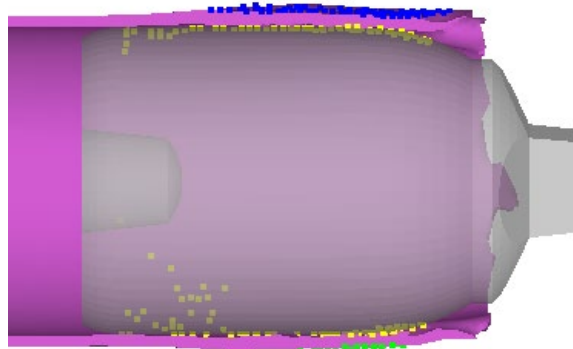
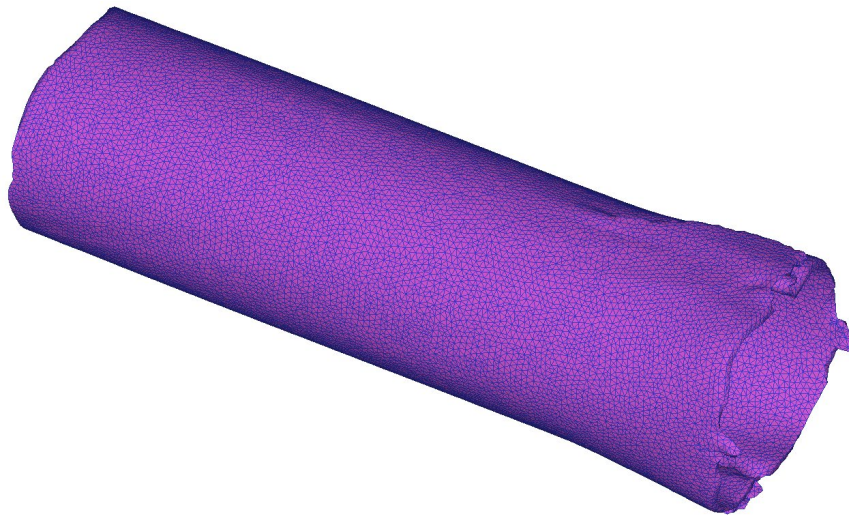


Рисунок 3.19 – Посадка трубы на оправку, вызванная потерей устойчивости трубы при раскатке дефекта

В результате первоначальной установки оправки со смещением относительно пережима валков продольный дефект, оказавшийся вдавленным внутрь трубы, после прохождения через оправку выступает на поверхность в виде остаточного гребня или «разлохмаченного» конца, который необходимо исправлять при последующей операции калибровки, а в дальнейшем потребует удаления. На рисунке 3.20 представлено окончательное формоизменение трубной заготовки после обкатки



а



б

Рисунок 3.20 – Окончательной формоизменение трубной заготовки после обкатки: а – вид спереди; б – общий вид

Построим зависимости энергосиловых параметров для указанных режимов и настройки прокатного инструмента. Результаты моделирования показывают незначительные отклонения по энергосиловым параметрам при изменении осевого проскальзывания трубы в очаге деформации (в пределах 5%), в связи с чем зависимости рассматриваются для обобщённого случая обкатки. Для аппроксимации данных, полученных при моделировании процесса обкатки на разных маршрутах, используется алгоритм, который возвращает вектор F , содержащий квадратичные функции, коэффициентов линейной регрессии общего вида K . При использовании данного вида обработки данных

среднеквадратичная погрешность приближения значений исходных точек, оказывается минимальной [85].

3.3.2. Анализ энергосиловых параметров процесса обкатки в зависимости от профиля трубы

Рассмотрим случай прокатки труб диаметром $D=159$ мм. Согласно графикам, представленным на рисунке 3.21, в зависимости от толщины стенки в рассматриваемом диапазоне размеров, усилия при обкатке составляют от 57,5 кН до 55,8 кН. При раскатке «плавников» усилия возрастают до 107,6 кН в начале рассматриваемого интервала и до 141,9 кН в его конце (при наибольшем соотношении наружного диаметра к толщине стенки). Таким образом, возрастание значений усилий в конце стадии обкатки достигает от 46% до 60% относительно номинальных значений.

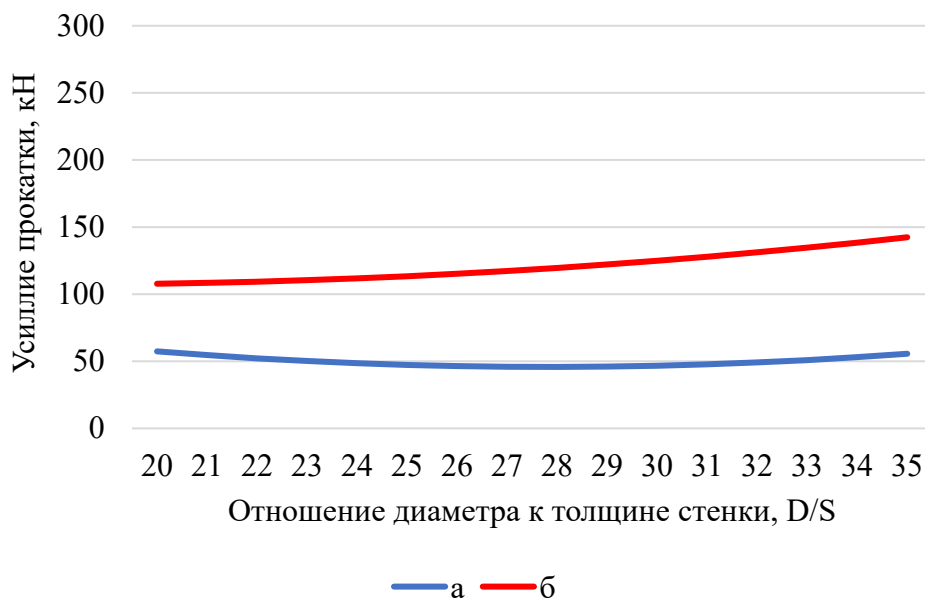


Рисунок 3.21 – Зависимость усилия прокатки от отношения диаметра к толщине стенки (при $D=159$ мм)

а – номинальные значения ($y = 0,19x^2 - 10,569x + 192,773$)

б – пиковые значения ($y = 0,119x^2 - 4,237x + 144,926$)

Момент прокатки для стационарных и пиковых значений изменяется в интервале: от 22,0 кН·м до 24,4 кН·м при стационарном режиме и от 38,3 кН·м

до 54,2 кН·м при раскатке дефектов (Рисунок 3.22). В результате моменты в пиковом состоянии превышают аналогичные значения для стационарного режима на 36,2% и 59,6%, соответственно, в начале и конце рассматриваемого диапазона.

В случае проворота трубы относительно оправки момент возрастает при $D/S=20$ на 12,1% (до величины 27,7 кН·м) и при $D/S=35$ на 23,4% (до величины 28,6 кН·м). Наиболее опасна данная ситуация в случае раскатки продольных дефектов, что сопровождается ростом величин до 63,7%.

Графики осевых усилий, изображённые на рисунке 3.23 не значительно изменяются для стационарной стадии: в пределах 85-90 кН; для пиковых значений: от 115,5 кН до 156,7 кН. В результате наблюдается возрастание пиковых усилий на 22% относительно стадии обкатки на нижней границе рассматриваемого диапазона и 45% на верхней границе.

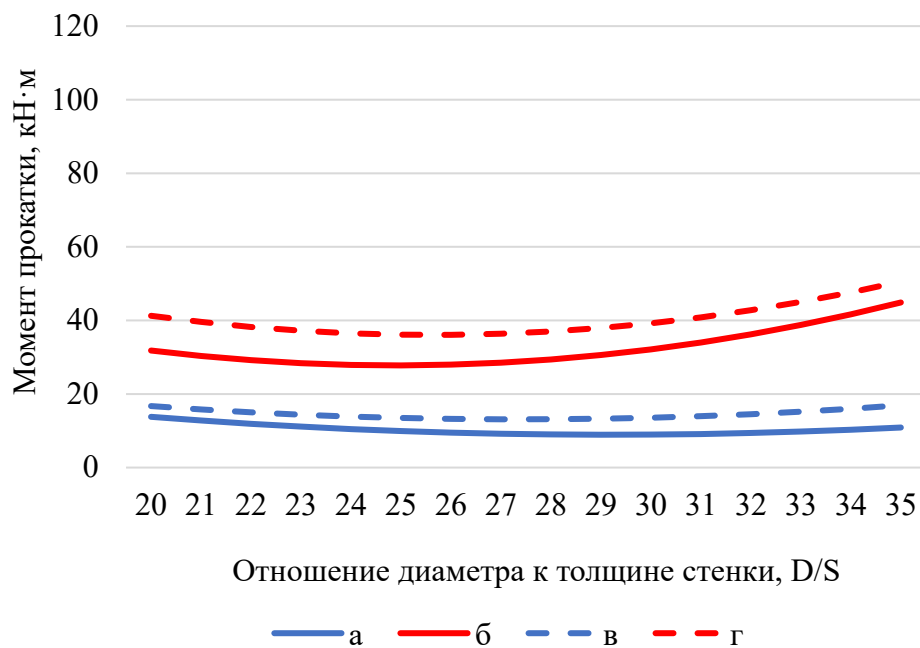


Рисунок 3.22 – Зависимость момента прокатки и момента прокатки при заклинивании оправки от отношения диаметра к толщине стенки (при $D=159$ мм)

а-номинальные значения ($y = 0,058x^2 - 3,383x + 58,255$)

б-пиковые значения ($y = 0,168x^2 - 8,369x + 131,993$)

в-номинальные значения при заклинивании ($y = 0,066x^2 - 3,615x + 62,609$)

г-пиковые значения при заклинивании ($y = 0,165x^2 - 8,456x + 144,395$)

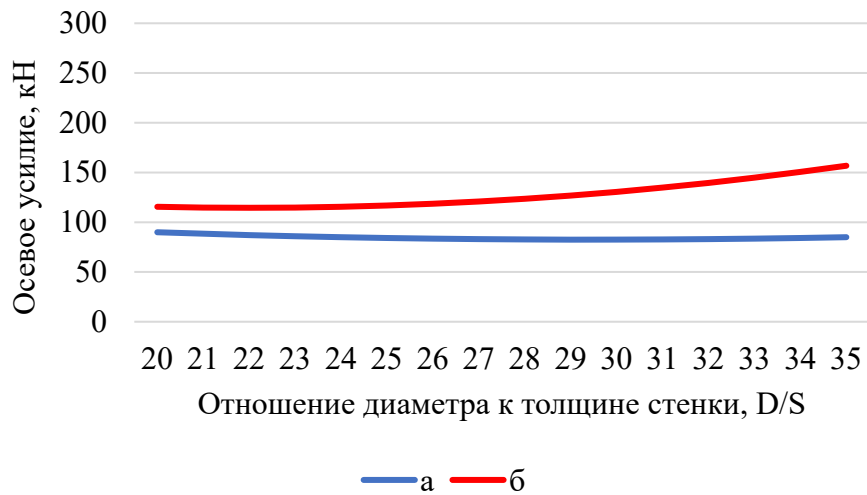


Рисунок 3.23 – Зависимость осевого усилия от отношения диаметра к толщине стенки (при $D=159$ мм)

а-номинальные значения ($y = 0,083x^2 - 4,895x + 154,644$)

б-пиковые значения ($y = 0,249x^2 - 10,943x + 234,774$)

Аналогичные зависимости получены для типоразмера труб диаметром 168 мм. На рисунке 3.24 представлена зависимость усилия прокатки от отношения диаметра к толщине стенки. Согласно имеющимся данным с утонением стенки трубы в рассматриваемом диапазоне размеров усилия обкатки возрастают от 64,7 кН до 67,7 кН. При раскатке «плавников» усилия составляют от 111 кН до 150,2 кН, что приводит к возрастанию на 41% в начале интервала и 55% в конце относительно стадии обкатки основного тела трубы.

Момент прокатки для стационарных значений изменяется в интервале от 22,3 кН·м до 26,1 кН·м; при пиках наблюдаются значения от 33,8 кН·м до 58,6 кН·м, что превышает аналогичные показатели стационарного режима на 34% и 55,4% для границ рассматриваемого диапазона. Зависимость момента прокатки от отношения диаметра к толщине стенки показана на рисунке 3.25 а, б.

При остановке вращения оправки момент, затрачиваемый на проворот трубы, даёт прирост суммарного момента прокатки от 20% до 28% по сравнению с номинальными значениями до величин, соответственно, 31,0 кН·м и 32,6 кН·м. Наиболее опасна данная ситуация в случае раскатки продольных дефектов, что сопровождается ростом величин на 42,2% и 62,2% для крайних значений

рассматриваемого диапазона. Зависимость момента прокатки при заклинивании от отношения диаметра к толщине стенки показана на рисунке 3.25 в, г.

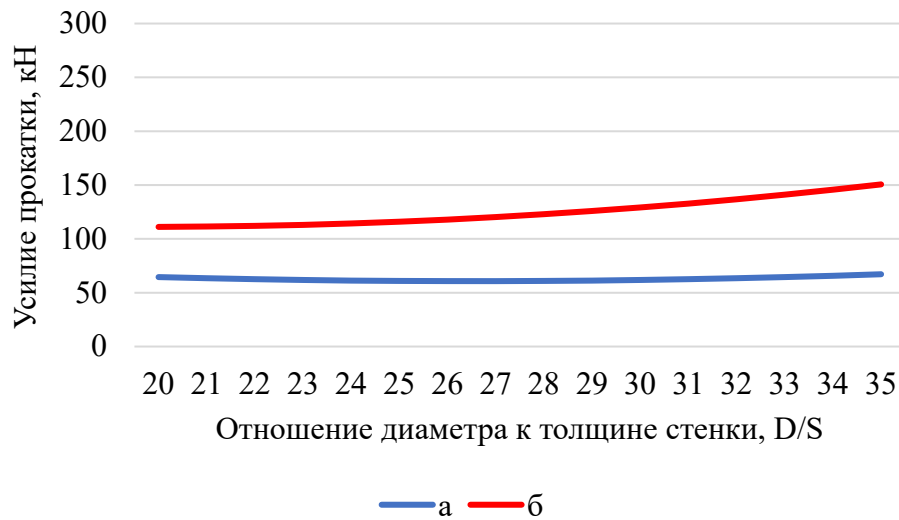


Рисунок 3.24 – Зависимость усилия прокатки от отношения диаметра к толщине стенки (при D=168 мм)

а-номинальные значения ($y = 0,89x^2 - 4,719x + 123,278$)

б-пиковые значения ($y = 0,166x^2 - 6,498x + 174,67$)

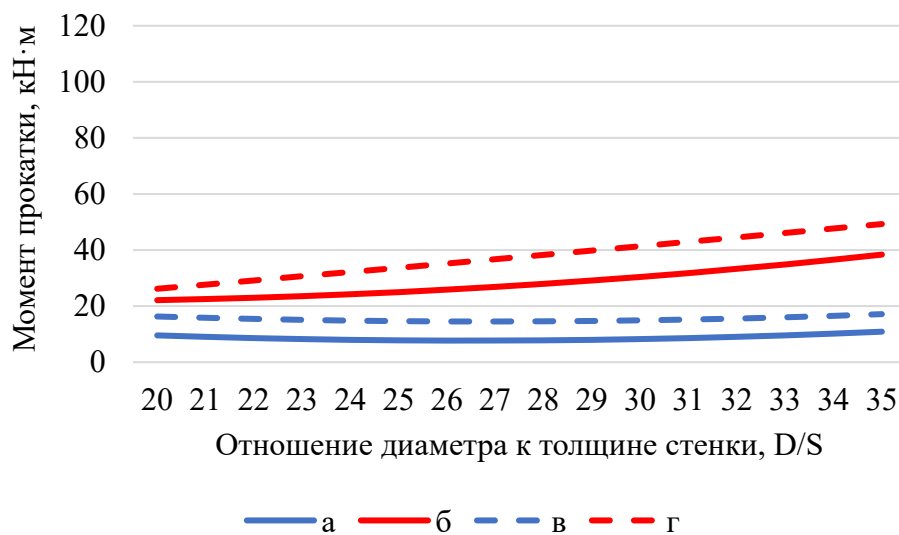


Рисунок 3.25 – Зависимость момента прокатки и момента прокатки при заклинивании оправки от отношения диаметра к толщине стенки (при D=168 мм)

а-номинальные значения ($y = 0,044x^2 - 2,331x + 38,582$)

б-пиковые значения ($y = 0,051x^2 - 1,722x + 36,178$)

в-номинальные значения при заклинивании ($y = 0,039x^2 - 2,09x + 42,531$)

г-пиковые значения при заклинивании ($y = 0,0042x^2 + 1,307x - 1,613$)

Графики осевых усилий, изображённые на рисунке 3.26, для стационарной стадии изменяются незначительно: имеет место снижение величин от 109,8 кН до 108,8 кН. Для пиковых значений, тем не менее, наблюдается рост от 135 кН до 200 кН. Рост осевых усилий при обкатке концевых дефектов для нижней части рассматриваемого интервала равен 18% и для верхней части достигает 45%.

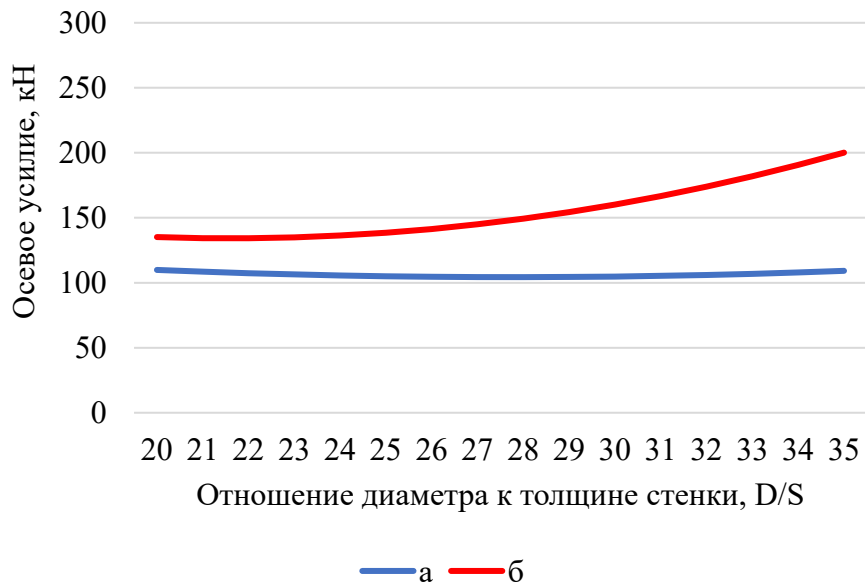


Рисунок 3.26 – Зависимость осевого усилия от отношения диаметра к толщине стенки (при $D=168$ мм)

а-номинальные значения ($y = 0,092x^2 - 5,108x + 175,233$)

б-пиковые значения ($y = 0,366x^2 - 15,797x + 304,652$)

Для труб с номинальным значением наружного диаметра 194 мм получены зависимости усилия прокатки от параметра тонкостенности трубы, представленные на рисунке 3.27. Средние значения усилия составляют 80,3 кН для соотношения $D/S = 20$ и 88,4 кН для соотношения $D/S = 35$. Пиковые значения, полученные при обкатке дефектных задних концов трубы, составляют 151,3 кН (рост на 46% по сравнению со стационарным значением) и 201 кН (рост на 56%) для аналогичных соотношений D/S .

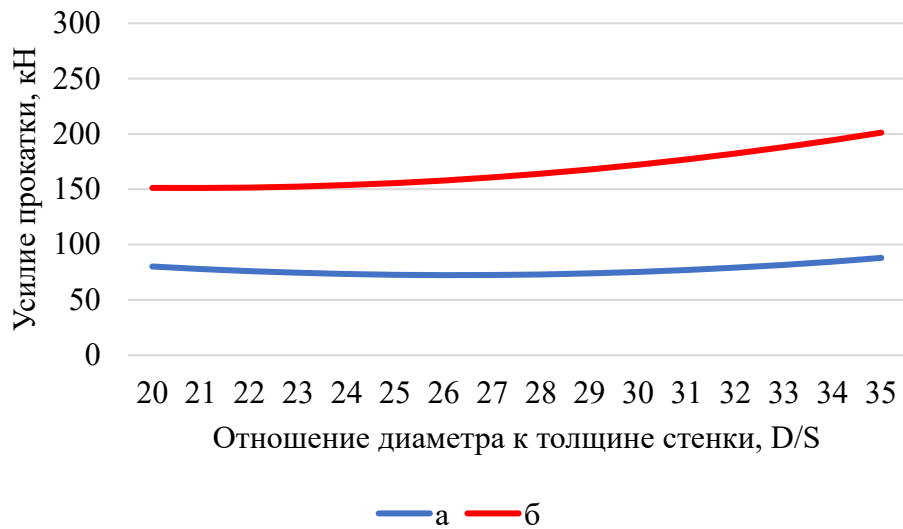


Рисунок 3.27 – Зависимость усилия прокатки от отношения диаметра к толщине стенки (при $D=194$ мм)

а-номинальные значения ($y = 0,203x^2 - 10,652x + 212,095$)

б-пиковые значения ($y = 0,246x^2 - 10,206x + 257,002$)

Рост усилия приводит к росту крутящих моментов на прокатных валках. В указанном интервале происходит рост значений этих величин от 11,4 кН·м до 13,9 кН·м при стационарном режиме и от 20,9 кН·м до 33,6 кН·м при пиковых значениях. Превышение пиковых нагрузок, таким образом, относительно стационарных находится в пределах 45–58%.

Сходный характер имеют зависимости, полученные путём моделирования проворота трубы относительно оправки: крутящий момент в установившемся процессе обкатки имеет среднее значение на 42% превышающее значение при нормальном течение процесса при $D/S=20$ и на ту же величину значение, рассчитанное при $D/S=35$: 29,1 кН·м и 33,1 кН·м. При попадании в калибр продольных концевых дефектов нагрузки интенсифицируются и возрастают до 66% и 69%. Зависимость момента прокатки и момента прокатки при заклинивании оправки от отношения диаметра к толщине стенки представлена на рисунке 3.28.

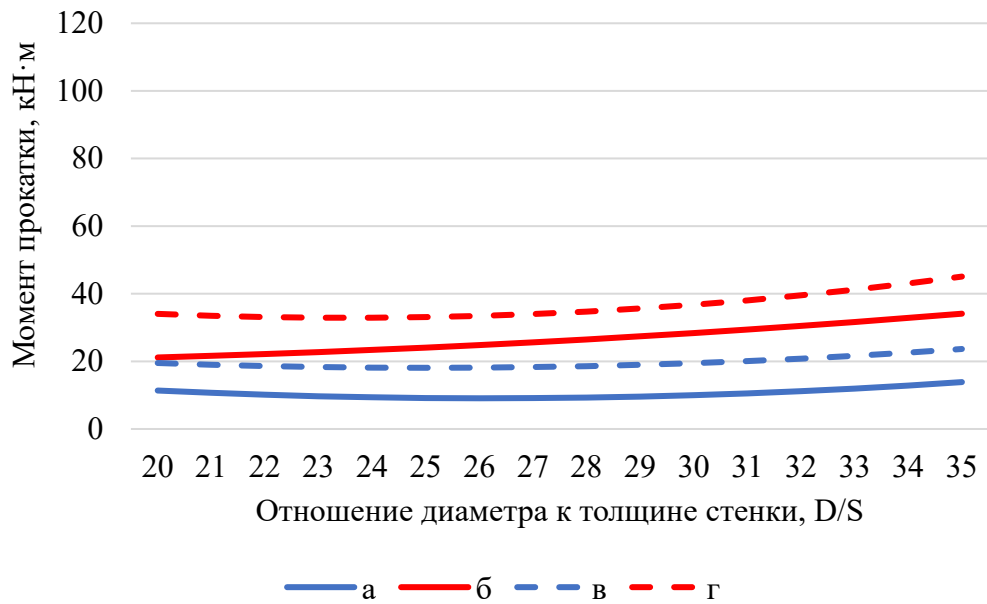


Рисунок 3.28 – Зависимость момента прокатки и момента прокатки при заклинивании оправки от отношения диаметра к толщине стенки (при $D=194$ мм)

а-номинальные значения ($y = 0,061 - 3,189x + 50,758$)

б-пиковые значения ($y = 0,028x^2 - 0,677x + 23,491$)

в-номинальные значения при заклинивании ($y = 0,056x^2 - 2,804x + 53,197$)

г-пиковые значения при заклинивании ($y = 0,093x^2 - 4,381x + 84,484$)

Осевые усилия, представленные на рисунке 3.29 демонстрируют рост значений на рассматриваемом интервале от 127,9 кН до 136,2 кН при установившемся течении процесса, а в случае раскатки продольных дефектов от 169,3 кН до 219 кН, что равняется приблизительно 24% от номинальных значений при прокатке труб с наиболее толстой стенкой и до 37% при обкатке наиболее тонкостенных труб рассматриваемого диапазона.

Графики зависимости усилий прокатки, моментов и осевых усилий для типоразмера труб 219 представлены на рисунках 3.30–3.32. Согласно графикам, усилия прокатки находятся в пределах 95,9-96,9 кН для стационарной стадии процесса и зависимость от 176,7 кН до 220,6 кН при выходе дефектного заднего конца трубы из клетки. Расчётные отклонения между номинальными и пиковыми значениями изменяются на 45% до 56% в начале и конце исследуемого интервала.

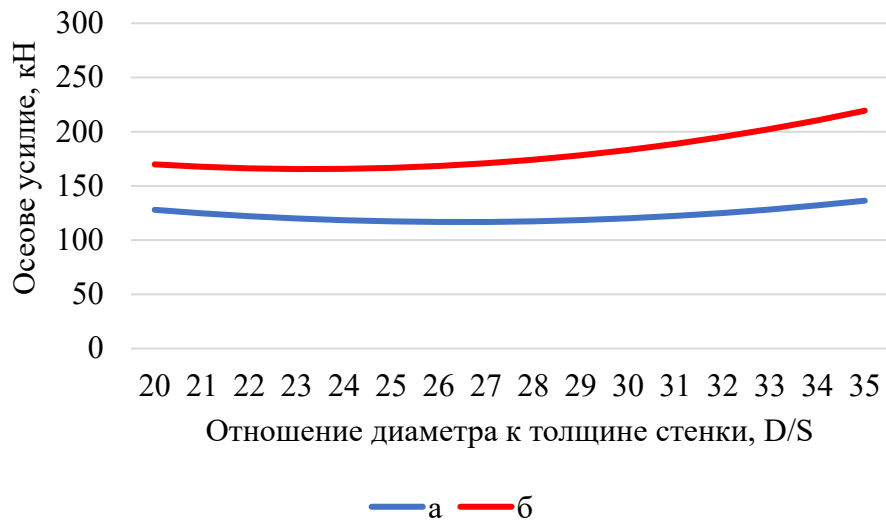


Рисунок 3.29 – Зависимость параметра осевого усилия от отношения диаметра к толщине стенки (при D=194 мм)

а-номинальные значения ($y = 0,269x^2 - 14,231x + 304,929$)

б-пиковые значения ($y = 0,395x^2 - 1,424x + 380,324$)

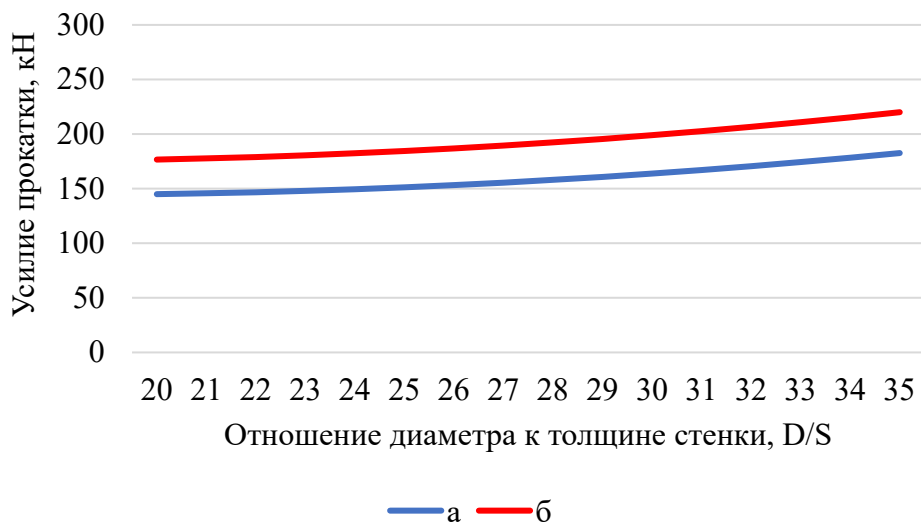


Рисунок 3.30 – Зависимость параметра усилия прокатки от отношения диаметра к толщине стенки (при D=219 мм)

а-номинальные значения ($y = 0,125x^2 - 6,829x + 182,321$)

б-пиковые значения ($y = 0,036x^2 - 1,74x + 154,174$)

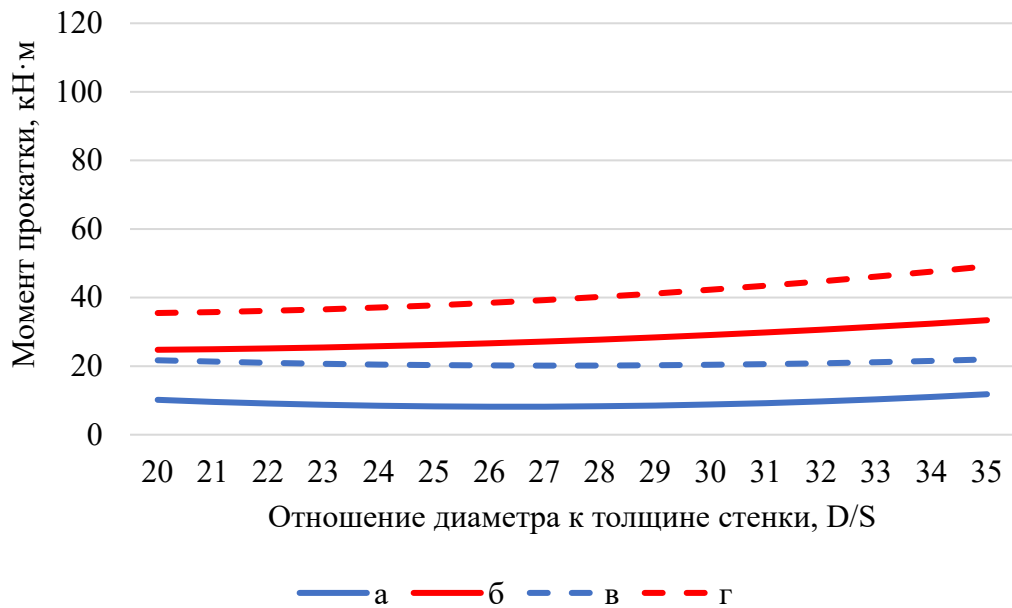


Рисунок 3.31 – Зависимость момента прокатки и момента прокатки при заклинивании оправки от отношения диаметра к толщине стенки (при D=219 мм)

а-номинальные значения ($y = 0,049x^2 - 2,585x + 42,255$)

б-пиковые значения ($y = 0,029x^2 - 1,02x + 33,57$)

в-номинальные значения при заклинивании ($y = 0,03x^2 - 1,634x + 42,4$)

г-пиковые значения при заклинивании ($y = 0,046x^2 - 1,622x + 49,537$)

Для момента прокатки полученные значения для установившейся стадии имеют средние значения от 9,9 кН·м до 11,2 кН·м и достигают пиковых значений в пределах 24,9–33,9 кН·м. Таким образом, моменты в пиковом состоянии превышают номинальные значения от 60% до 67%.

При заклинивании оправки на стержне момент прокатки возрастает для установившегося режима обкатки до величин соответственно 24,9 кН·м при D/S=20 и 33,98 кН·м при D/S=35, что превышает аналогичные значения, полученные при вращении оправки вместе с трубой, на 54% на 48%. При раскатке продольных дефектов нагрузка увеличивается на 72–77% в указанном диапазоне.

График осевых усилий демонстрирует, что при установившемся процессе средние значения возрастают по мере роста показателя тонкостенности трубы от 133,9 кН до 137,7 кН; для пиковых значений также имеет место рост от 174 кН до 219,9 кН. В результате расчёта отклонение пиковых усилий от номинальных составляет 23% на нижней границе интервала и 37% на верхней границе.

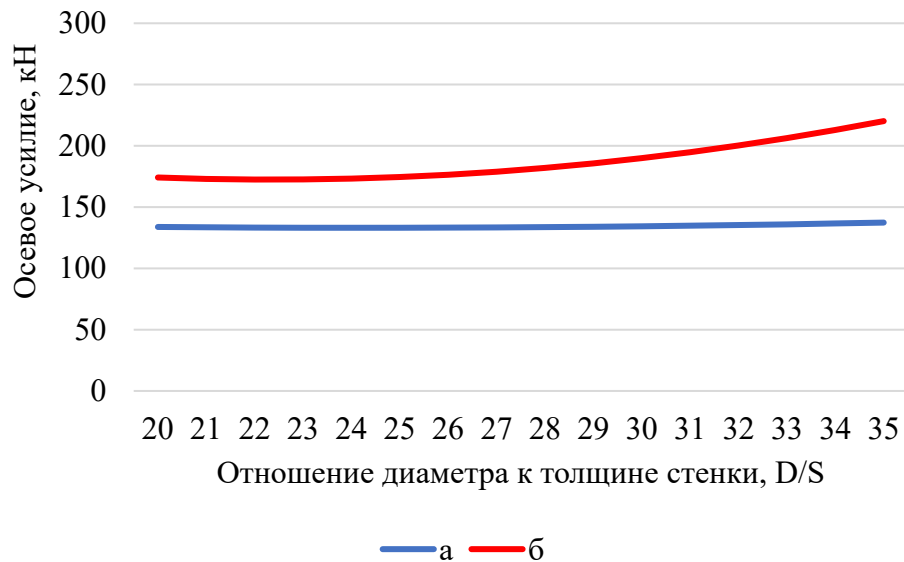


Рисунок 3.32 – Зависимость параметра осевого усилия от отношения диаметра к толщине стенки (при $D=219$ мм)

а-номинальные значения ($y = 0,036x^2 - 1,74x + 154,174$)

б-пиковые значения ($y = 0,298 - 13,319x + 321,289$)

Наибольшим диаметром из существующих и прокатываемых на исследуемой установке ТПА-220 является наружный диаметр 245 мм. Графики зависимостей энергосиловых параметров на данном типоразмере труб приведены на рисунке 3.33-3.35.

Перечислим основные результаты, полученные при их обработке: изменение среднего усилия прокатки установившегося процесса в указанном интервале исследуемых величин от 115,82 кН до 188,9 кН; изменение пиковых усилий при раскатке продольных «плавников» находится в пределах от 199,6 кН (42% номинального значения) до 269,1 кН (56%).

Опишем полученные значения для моментов прокатки согласно их расположению на графике, представленном на рисунке 3.34 снизу вверх: номинальные значения, полученные для установившегося момента прокатки 14,07-14,7 кН·м; значения, полученные при заклинивании оправки для установившегося режима: от 26,4 кН·м до 26,6 кН·м (что превышает номинальные значения на 37% и 46%, соответственно).

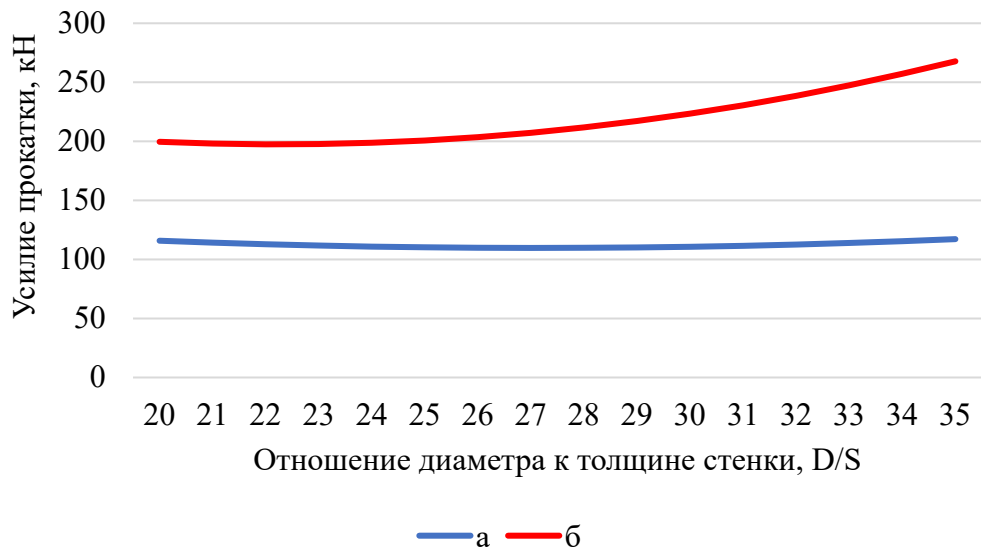


Рисунок 3.33 – Зависимость усилия прокатки от отношения диаметра к толщине стенки (при D=245 мм)

а-номинальные значения ($y = 0,12x^2 - 6,508x + 197,96$)

б-пиковые значения ($y = 0,432x^2 - 19,215x + 411,1$)

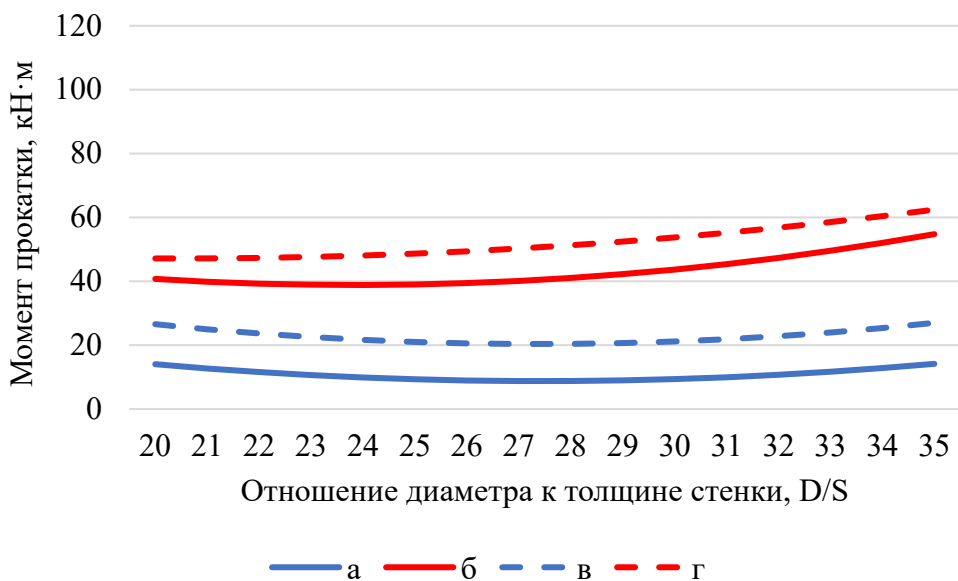


Рисунок 3.34 – Зависимость момента прокатки и момента прокатки при заклинивании оправки от отношения диаметра к толщине стенки (при D=245 мм)

а-номинальные значения ($y = 0,095x^2 - 5,217x + 80,378$)

б-пиковые значения ($y = 0,128x^2 - 6,105x + 111,632$)

в-номинальные значения при заклинивании ($y = 0,114x^2 - 6,241x + 105,779$)

г-пиковые значения при заклинивании ($y = 0,72x^2 - 2,941x + 77,173$)

Значения пиковых нагрузок в момент раскатки продольных дефектов от 40,6 кН·м до 55,4 кН·м (рост нагрузок по сравнению с номинальными

значениями на 51% и 64%); значения пиковых нагрузок при одновременной раскатке утолщённой стенки и проскальзывании трубы по оправке изменяется от 46,9 кН до 61,9 кН (70% и 77% от номинальных нагрузок при обкатке трубы).

Графики осевых усилий, представленные на рисунке 3.35, имеют характер, подобный графикам зависимостей, полученных для предыдущих размеров. В частности, наблюдается снижение усилия на оправке в стационарной стадии обкатки от 144,7 кН до 153,7 кН. Рост значений для пиковых усилий от 185,4 кН до 249,82 кН, что приблизительно на 22% превышает значения при устранившемся режиме для $D/S = 20$ и на 38% аналогичные значения для верхней границы интервала размеров ($D/S = 35$).

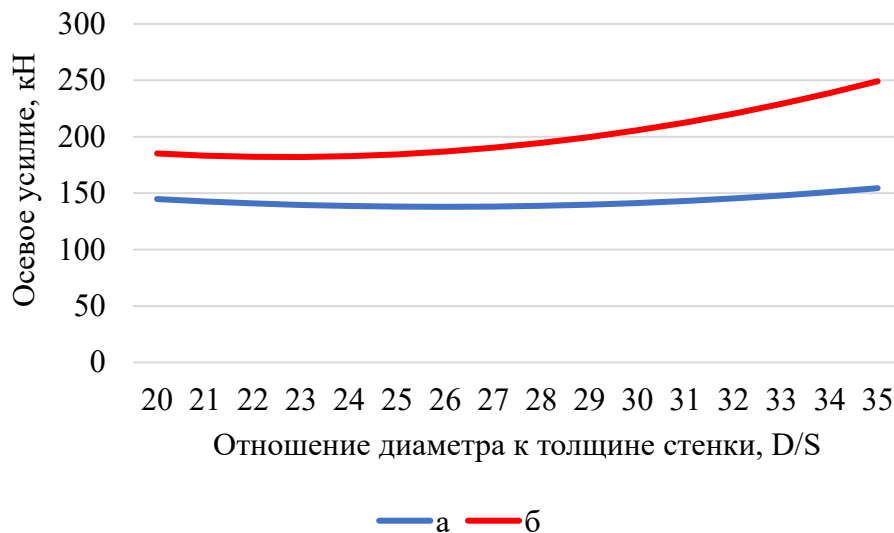


Рисунок 3.35 – Зависимость осевого усилия от отношения диаметра к толщине стенки (при $D=245$ мм)

а-номинальные значения ($y = 0,198x^2 - 10,2471x + 270,52$)

б-пиковые значения ($y = 0,443x^2 - 20,097x + 409,931$)

3.3.3. Оценка энергосиловых параметров процесса обкатки в зависимости от типоразмера труб

Выполним оценку имеющихся величин в зависимости от наружного диаметра готовой трубы. Для обработки имеющихся значений использована процедура линейного сглаживания на основе метода наименьших квадратов, которая позволяет получить линейные зависимости для нагрузок, действующих

на инструмент при различных случаях прокатки, в том числе для различной толстостенности труб.

Рассмотрим случай прокатки труб при $D/S=20$ (трубы наименьшей тонкостенности рассматриваемого сортамента). Согласно графикам, представленным на рисунке 3.36, при увеличении диаметра трубы усилия при обкатке изменяются от 59,3 кН до 134,7 кН, что соответствует 56%. При раскатке «плавников» усилия возрастают до 106,7 кН в начале рассматриваемого интервала и до 203,1 кН в его конце, что соответствует 47%.

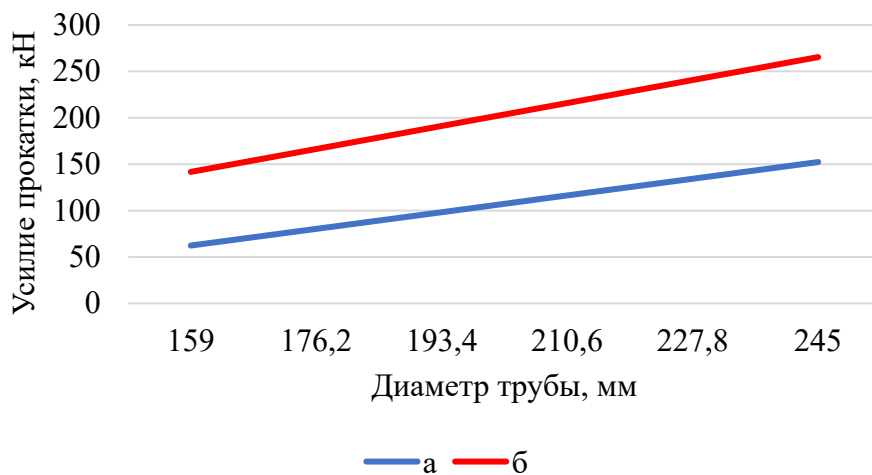


Рисунок 3.36 – Зависимость усилия прокатки от диаметра (при $D/S=20$)

а-номинальные значения ($y = 0,88x - 80,14$)

б-пиковые значения ($y = 1,12x - 71,52$)

Для отношения $D/S=24$ усилия при обкатке возрастают в стационарной стадии от 53 кН до 133,8 кН (60%) и при раскатке «плавников» от 110,9 кН до 204,4 кН в указанном диапазоне, что составляет 45%, графики изменения усилий представлены на рисунке 3.37.

При отношении $D/S=28$ для зависимости усилий прокатки по мере увеличения диаметра наблюдается рост от 51,96 кН до 136,5 кН в стационарной стадии (приблизительно 62%) и рост от значения 118,8 кН в начале рассматриваемого интервала до 216,9 кН в его конце при обкатке концевых

дефектов (на 45%). Графики изменения усилий при отношении $D/S=28$ представлены на рисунке 3.38

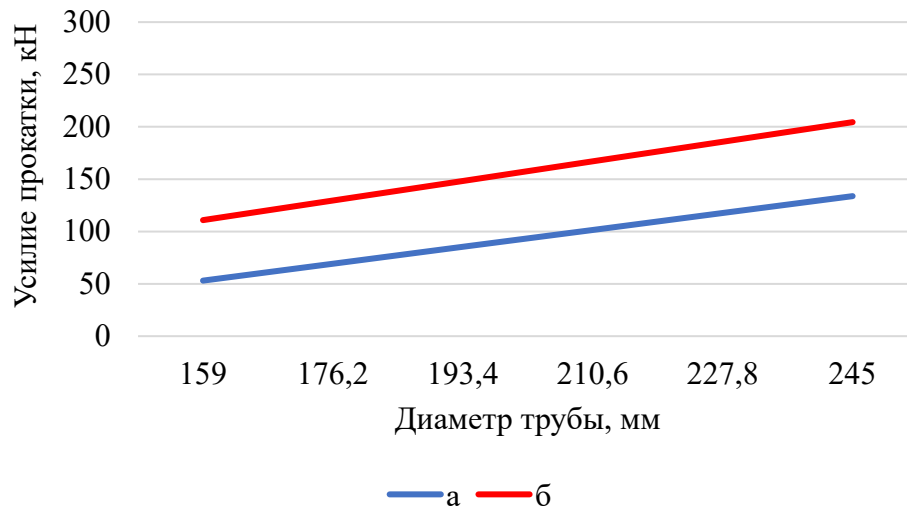


Рисунок 3.37 – Зависимость усилия прокатки от диаметра (при $D/S=24$)

а-номинальные значения ($y = 0,94x - 96,15$)

б-пиковые значения ($y = 1,09x - 62,15$)

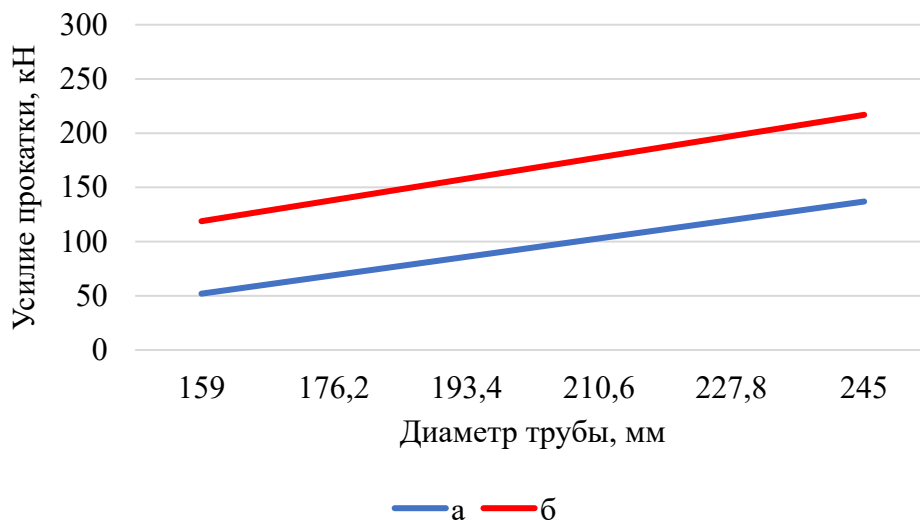


Рисунок 3.38 – Зависимость усилия прокатки от диаметра (при $D/S=28$)

а-номинальные значения ($y = 0,99x - 105,16$)

б-пиковые значения ($y = 1,14x - 62,62$)

Согласно графикам, представленным на рисунке 3.39, значения усилий прокатки для диаметра 159 мм (55,9 кН) на 57% меньше аналогичного значения (144,2 кН) для диаметра 245 мм (при прокатке в стационарной стадии). Разница

между пиковыми значениями достигает 48% от 130,5 кН в начале рассматриваемого интервала и до 240,5 кН в его конце.

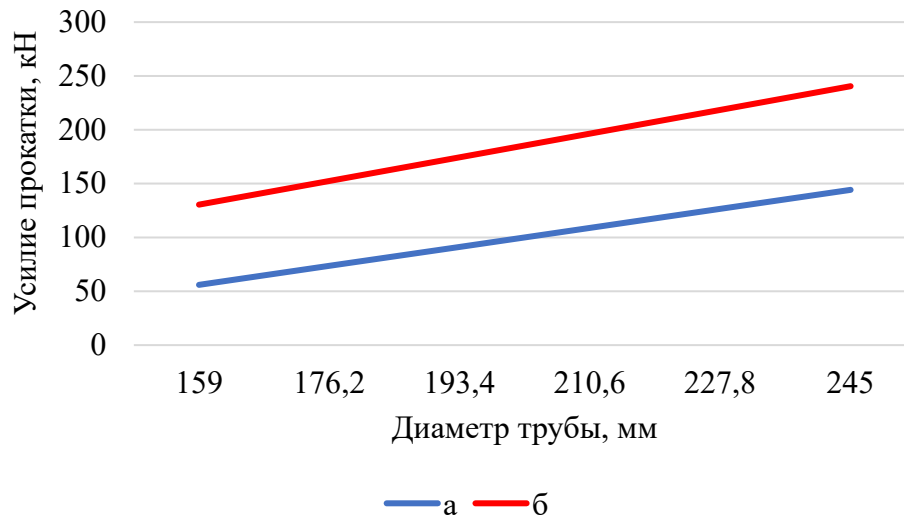


Рисунок 3.39 – Зависимость усилия прокатки от диаметра (при $D/S=32$)

а-номинальные значения ($y = 1,03x - 107,144$)

б-пиковые значения ($y = 1,28x - 72,89$)

Рассмотрим случай прокатки наиболее тонкостенных труб в рассматриваемом диапазоне ($D/S=35$), графики представлены на рисунке 3.40.

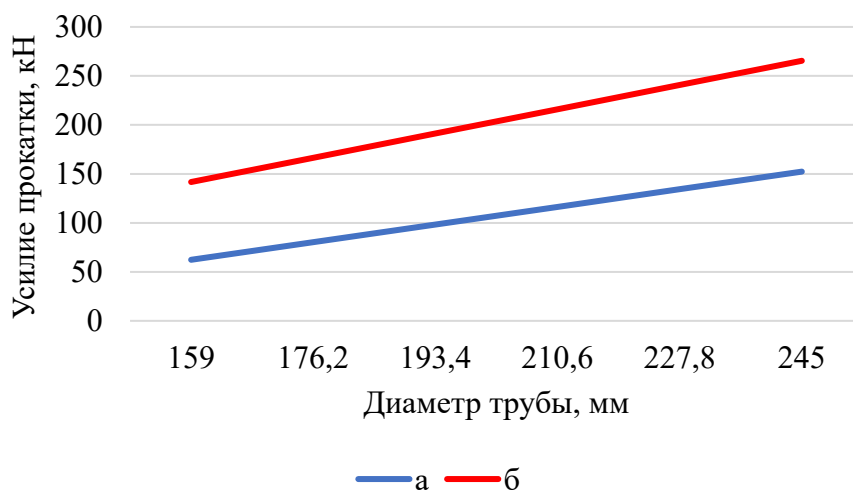


Рисунок 3.40 – Зависимость усилия прокатки от диаметра (при $D/S=35$)

а-номинальные значения ($y = 1,05x - 104,04$)

б-пиковые значения ($y = 1,43x - 87,04$)

В стационарной стадии обкатки трубы усилие изменяется от 62,33 кН до 152,32 кН. При раскатке продольных концевых дефектов усилия возрастают до 141,72 кН в начале рассматриваемого интервала и до 265,45 кН при наибольшем номинальном диаметре трубы. С увеличением диаметра наблюдается рост на 59% при стационарном режиме от значений при минимальном диаметре и на 46% при пиковых значениях.

Аналогичные зависимости получены для моментов на прокатных валках. Для анализа зависимостей моментов прокатки интерес представляет не только рост значений по мере увеличения диаметра готовой трубы, но и отношение аналогичных значений к случаю стационарной прокатки труб.

При отношении $D/S=20$ момент прокатки для стационарных и пиковых значений изменяется в интервале: от 11,3 кН·м до 12,44 кН·м при стационарном режиме и от 23,74 кН·м до 33,65 кН·м при пиковых значениях, что показывают графики, изображённые на рисунке 3.41.

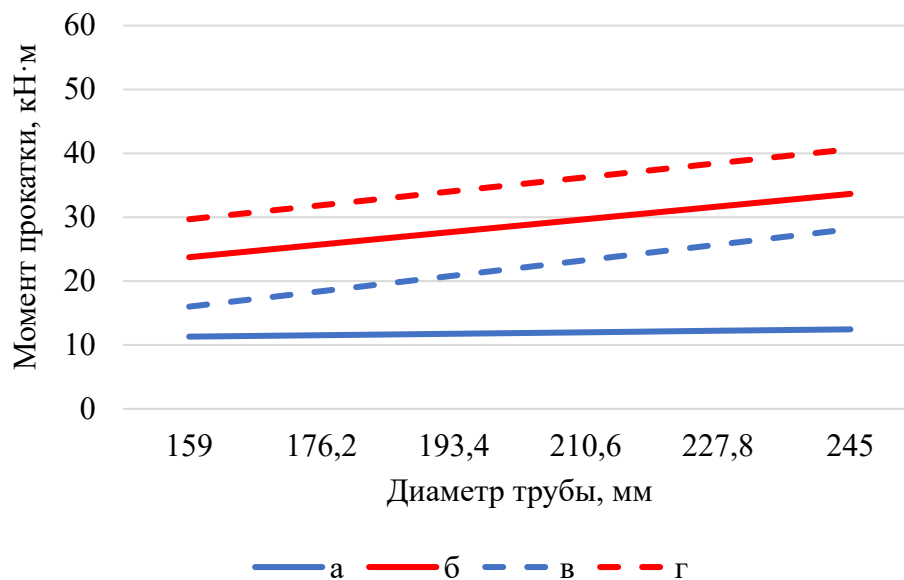


Рисунок 3.41 – Зависимость момента прокатки и момента прокатки при заклинивании оправки от диаметра (при $D/S=20$)
 а-номинальные значения ($y = 0,01x + 9,2$)
 б-пиковые значения ($y = 0,12x + 5,41$)
 в-номинальные значения при заклинивании ($y = 0,14x - 6,45$)
 г-пиковые значения при заклинивании ($y = 0,13x - 9,4$)

Таким образом, моменты в пиковом состоянии превышают аналогичные значения от 53% до 63% для стационарного режима. Момент прокатки возрастает с увеличением диаметра на 9% при стационарном режиме и на 29% при пиковых значениях.

В случае проворота трубы относительно оправки момент возрастает при $D=159$ мм на 29% и при $D=245$ мм на 56% по сравнению с номинальными значениями до величин соответственно 16 кН·м и 28,1 кН·м. Наиболее опасна данная ситуация в случае раскатки продольных дефектов, что сопровождается ростом величин на 62% и 69% для крайних значений рассматриваемого диапазона. При провороте трубы по мере увеличения диаметра трубы момент прокатки возрастает на 43% и 27% при стационарных и пиковых значениях соответственно.

При отношении $D/S=24$ момент прокатки для стационарных значений не значительно отклоняется от значения 9,2 кН·м (в пределах 1%) и для пиковых от 23,6 кН·м до 33,7 кН·м (рост 30%). Значения моментов при раскатке концевых дефектов превышают аналогичные значения в стационарной стадии от 61% до 72%.

При неподвижной оправке величина момента повышается (от 14,2 кН·м и 22,3 кН·м) на 36% для стационарной стадии, что превышает при свободно вращающейся оправке при $D=159$ на 35% и при $D=245$ на 58% по сравнению с номинальными значениями до величин соответственно. В продолжении процесса разглаживание дефектов превышает номинальные значения на 68% и 78%; рост величин с повышением диаметра до 30%. Графики изменения момента прокатки представлены на рисунке 3.42.

С изменением отношения до $D/S=28$ момент прокатки при стационарной прокатке остаётся практически неизменным: от 8,57 кН·м до 8,7 кН·м (рост не превышает 1%); пиковые значения изменяются от 26,2 кН·м до 35,94 кН·м (в пределах 27%), что видно из графиков представленных на рисунке 3.43 Сравнение величин между собой даёт разницу 67% для начала исследуемого интервала и до 75% при максимальном значении диаметра $D=245$ мм. При

неподвижной оправке необходимое значение момента для осуществления процесса возрастает на 59% (при $D = 245$ мм) в стационарной стадии и на 80% при раскатке «плавников».

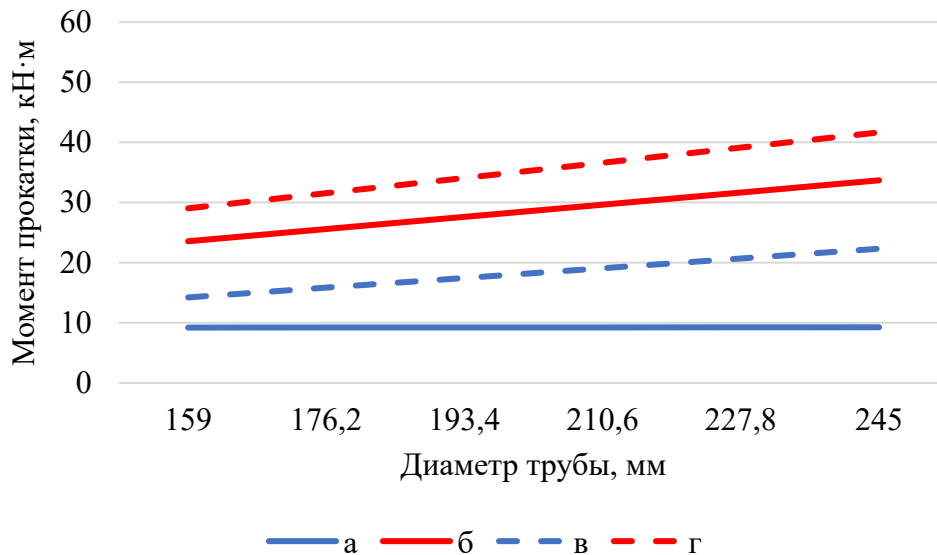


Рисунок 3.42 – Зависимость момента прокатки и момента прокатки при заклинивании оправки от диаметра (при $D/S=24$)
 а-номинальные значения ($y = 0,0006x + 9,11$)
 б-пиковые значения ($y = 0,12x + 4,82$)
 в-номинальные значения при заклинивании ($y = 0,09x - 074$)
 г-пиковые значения при заклинивании ($y = 0,15x + 5,68$)

Прокатка тонкостенных труб на стационарной стадии даёт прирост значений моментов прокатки на 12% (при $D/S=32$): от 9,4 кН·м до 10,7 кН·м, график представлен на рисунке 3.44; и на 19% (при $D/S=35$): от 11 кН·м до 13,6 кН·м, график представлен на рисунке 3.45. Рост моментов прокатки при попадании в калибр концевых утолщений составляет от 31,8 кН·м до 40,4 кН·м при $D/S=32$ (увеличение на 21%). При $D/S=35$ рост также приблизительно равен 16% (от 37,8 кН·м до 45,3 кН·м). Сравнение со значениями стационарной стадии даёт превышение последних на 70–73%.

В случае заклинивания оправки относительно трубы при $D/S=32$ момент возрастает при $D=159$ мм на 38% (до 15 кН·м) и при $D=245$ мм на 54% (до 23 кН·м) по сравнению с номинальными значениями. При $D/S=35$ рост значений

момента в случае прокатки трубы на зафиксированной оправке находится в пределах 36-49% (17 кН·м для $D = 159$ мм и 27 кН·м для $D=245$ мм) по сравнению с номинальными значениями. Значения моментов на рассматриваемом диапазоне монотонно возрастают на 35%.

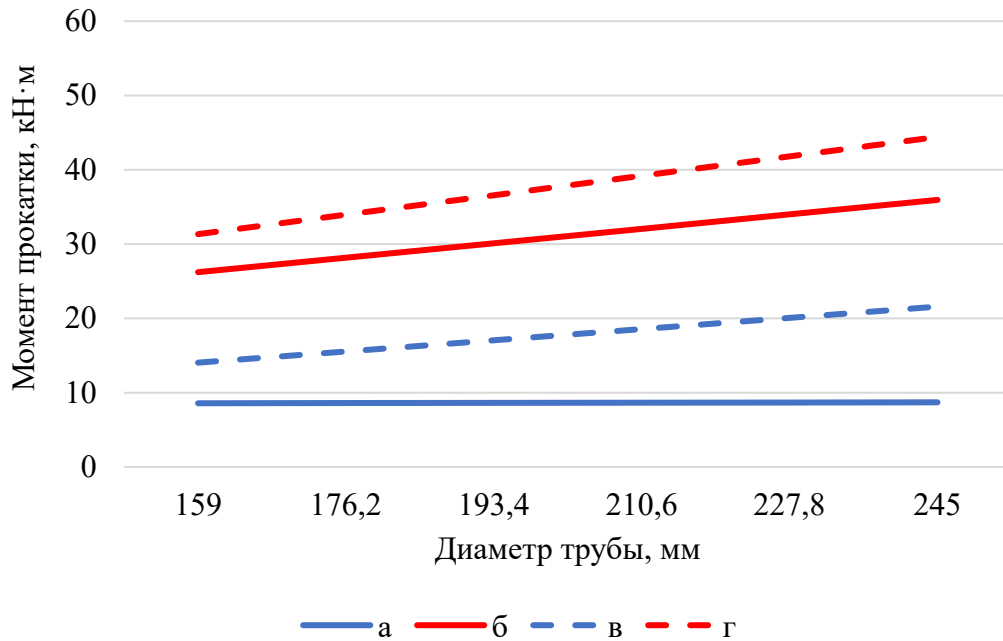


Рисунок 3.43 – Зависимость момента прокатки и момента прокатки при заклинивании оправки от диаметра (при $D/S=28$)

а-номинальные значения ($y = 0,001x + 8,35$)

б-пиковые значения ($y = 0,11x + 8,25$)

в-номинальные значения при заклинивании ($y = 0,09x + 0,11$)

г-пиковые значения при заклинивании ($y = 0,15x + 7,16$)

Нестационарная стадия, при которой происходит раскатка концевых дефектов приводит к повышению величин момента прокатки на 74-78% по отношению к установившимся значениям. Значения моментов прокатки при раскатке «плавников» с увеличением диаметров готовых труб в заданном промежутке повышаются на 25% для $D/S=32$ и на 20% при $D/S=35$.

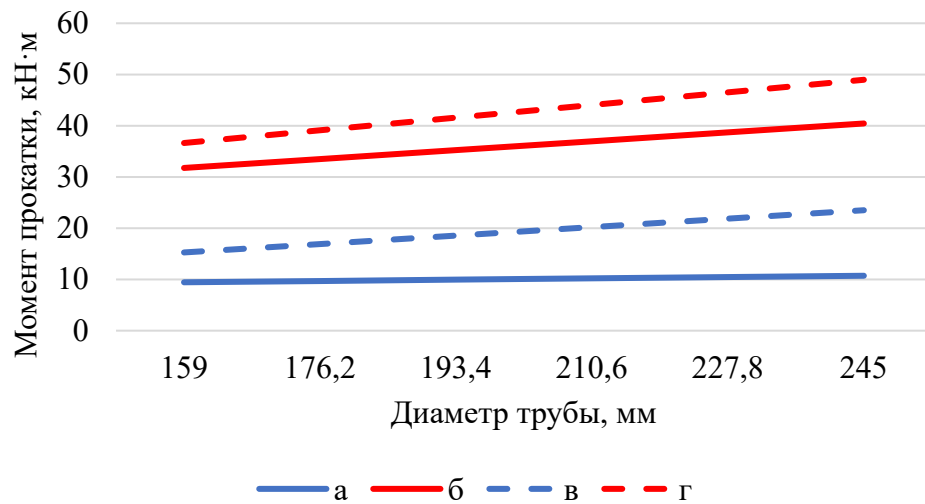


Рисунок 3.44 – Зависимость момента прокатки и момента прокатки при заклинивании оправки от диаметра (при $D/S=32$)

а-номинальные значения ($y = 0,01x + 7,09$)

б-пиковые значения ($y = 0,1x + 15,72$)

в-номинальные значения при заклинивании ($y = 0,09x + 0,04$)

г-пиковые значения при заклинивании ($y = 0,14x + 13,81$)

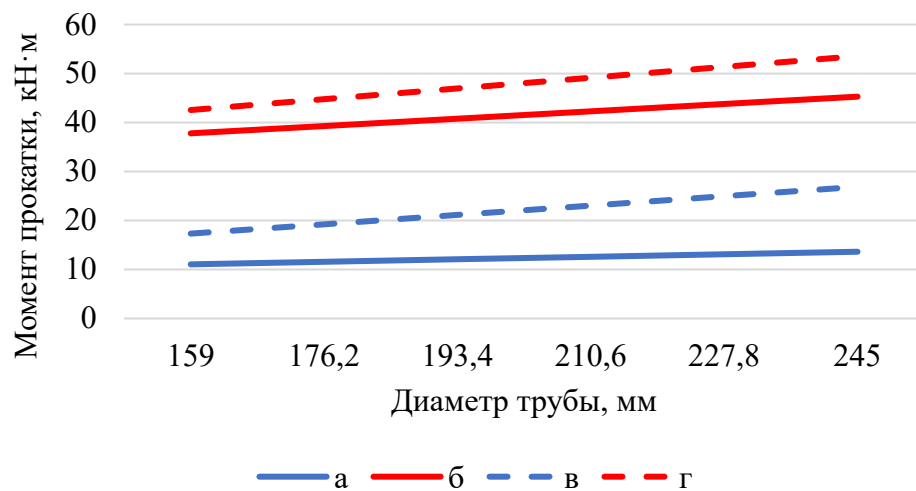


Рисунок 3.45 – Зависимость момента прокатки и момента прокатки при заклинивании оправки от диаметра (при $D/S=35$)

а-номинальные значения ($y = 0,03x + 6,29$)

б-пиковые значения ($y = 0,09x + 23,96$)

в-номинальные значения при заклинивании ($y = 0,11x - 0,32$)

г-пиковые значения при заклинивании ($y = 0,13x + 22,21$)

Аналогичным образом оценим зависимости осевых усилий для одинаковых классов тонкостенности труб при возрастании значений номинального диаметра. Как видно из графиков, представленных на рисунках

3.46-3.50, во всех случаях установившегося процесса прокатки изменение происходит в сторону возрастания: для отношения $D/S=20$ от 99,5 кН до 148,7 кН, что составляет примерно 33%; для $D/S=24$ от 94,9 кН до 143,9 кН (приблизительно 34%); для $D/S=28$ от 92,3 кН до 144,5 кН (около 36%); для $D/S=32$ от 93,9 кН до 150,6 кН (около 37%) и для $D/S=35$ от 97,3 кН до 158 кН, т.е. прирост равен 38%.

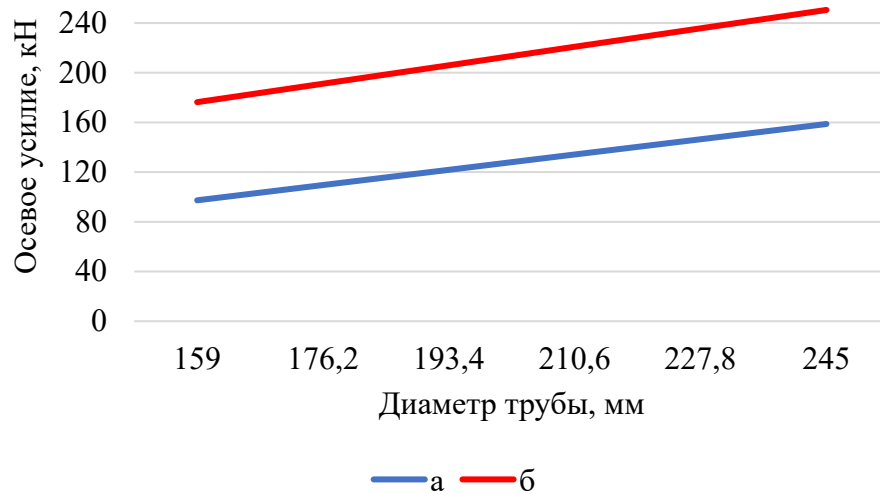


Рисунок 3.46 – Зависимость осевого усилия от диаметра (при $D/S=20$)
 а-номинальные значения ($y = 0,57x + 8,66$)
 б-пиковые значения ($y = 0,47x + 71,61$)

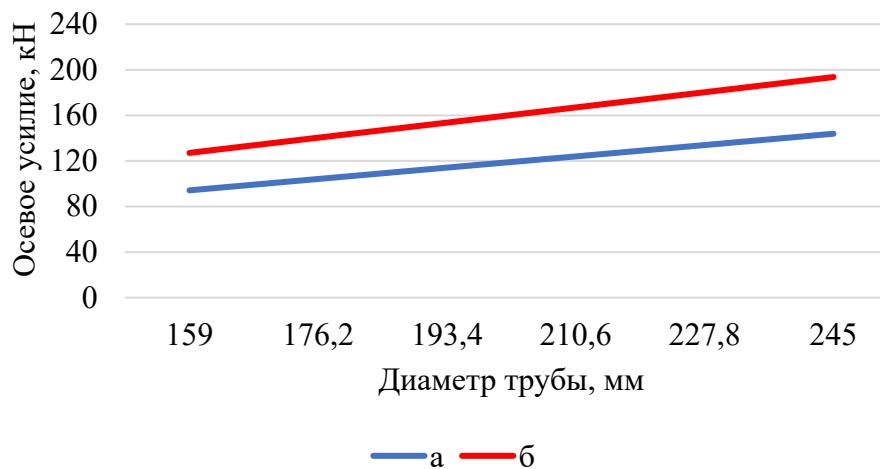


Рисунок 3.47 – Зависимость осевого усилия от диаметра (при $D/S=24$)
 а-номинальные значения ($y = 0,58x + 2,31$)
 б-пиковые значения ($y = 0,77x + 3,95$)

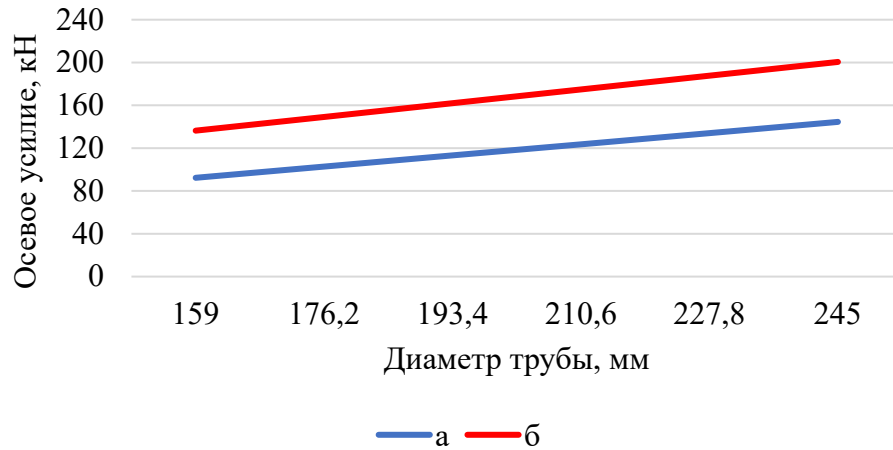


Рисунок 3.48 – Зависимость осевого усилия от диаметра (при $D/S=28$)
 а-номинальные значения ($y = 0,61x - 4,26$)
 б-пиковые значения ($y = 0,75x + 17,66$)

В случае перехода от установившейся стадии процесса к раскатке продольных дефектов изменяется характер имеющихся зависимостей осевых усилий. Для более толстостенных труб характер зависимостей сохраняет умеренное возрастание, что видно из графиков.

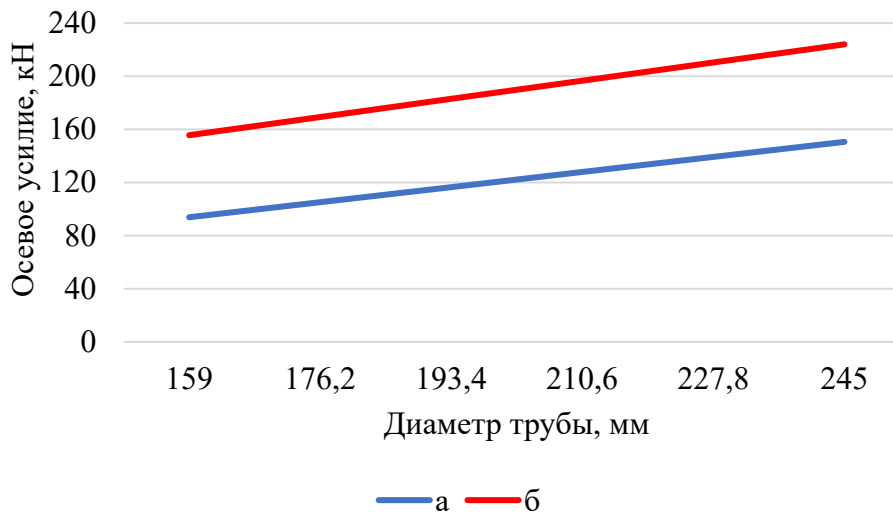


Рисунок 3.49 – Зависимость осевого усилия от диаметра (при $D/S=32$)
 а-номинальные значения ($y = 0,66x - 11,04$)
 б-пиковые значения ($y = 0,8x + 29,18$)

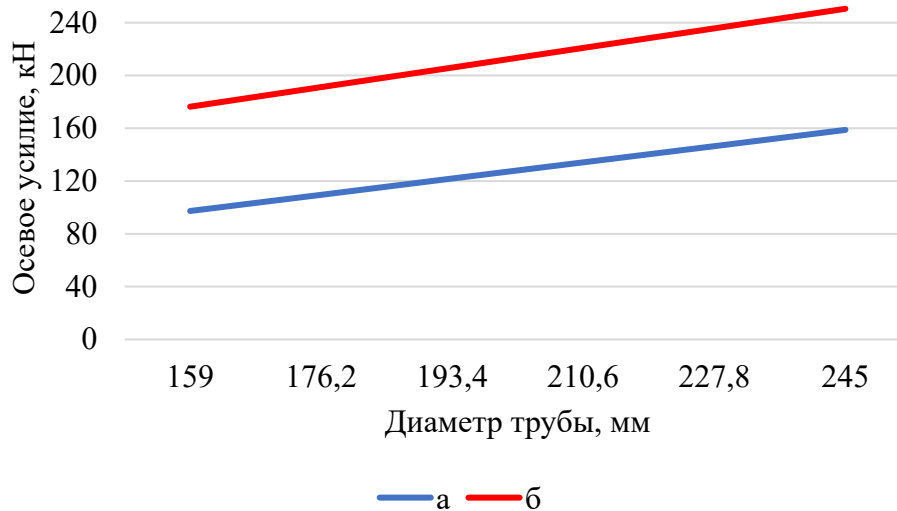


Рисунок 3.50 – Зависимость осевого усилия от диаметра (при $D/S=35$)

а-номинальные значения ($y = 0,71x - 16,26$)

б-пиковые значения ($y = 0,86x + 39,09$)

Например, при отношении наружного диаметра готовой трубы к толщине стенки $D/S=20$ рост сохраняется от 146,1 кН до 186,45 кН (21%), что на нижней границе рассматриваемого интервала превышает усилия в стационарной стадии на 31% и на 20% на верхней границе. При соотношении $D/S=24$ имеет место рост пиковых значений от 127,1 кН до 193,6 кН (около 34%), что превышает значения при установившейся прокатке на 25%.

Для более тонкостенных труб ($D/S=28$) интенсивность роста пиковых значений осевых усилий замедляется: от 136,3 кН до 200,5 кН (приблизительно 32%). Превышение значений установившегося процесса по нижней границе 32%, по верхней – 27%. Для отношения ($D/S=32$) рост значений внутри диапазона значений (от 155,6 кН до 224 кН) около 30%. Данный интервал значений превышает аналогичные значения в стационарной стадии на 40% и 33% для крайних точек.

В случае прокатки наиболее тонкостенной трубы из заданного в исследовании диапазона наблюдается снижение осевого усилия от 176,3 кН и до 250,6 кН на 30%. Данные величины на 45% и 37% превышают значения при установившемся режиме прокатки (для диаметров труб 159 мм и 245 мм, соответственно).

3.3.4. Оценка необходимого усилия подачи при обкатке

Для процесса обкатки труб также выполнена оценка необходимого усилия толкателя при начальной подаче трубы в калибр до захвата валками для различных типов труб по толстостенности. Зависимость усилия на толкателе от отношения диаметра к толщине стенки представлена на рисунке 3.51. Графики показывают, что для всех диаметров зависимости являются возрастающими: при диаметре трубы 159 мм усилия возрастают от 5,69 кН до 6,95 кН; при диаметре трубы 168 мм от 6,38 кН до 10,1 кН; при диаметре 194 мм от 6,46 кН до 12,51 кН; при диаметре 219 мм от 7,9 кН до 13,26 кН; при диаметре 245 мм от 10,37 кН до 17,38 кН.

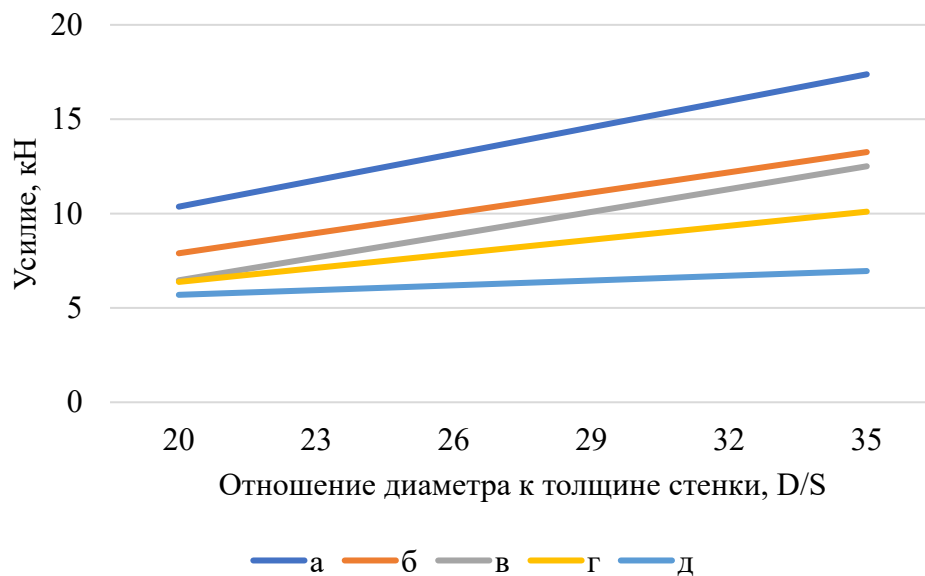


Рисунок 3.51 – Зависимость усилия на толкателе от отношения диаметра к толщине стенки, D/S: а – при диаметре 245 мм; б – при диаметре 219 мм; в – при диаметре 194 мм; г – при диаметре 168 мм; д – при диаметре 159 мм

3.4. Выводы по главе 3

1. Разработанный алгоритм создания модели процесса обкатки труб позволил выполнить численную реализацию процесса для заданных диапазонов исходных параметров, которая позволила получить формоизменение трубы на основных этапах деформирования, а также значения нагрузок, действующих на инструмент клетки.

2. Анализ особенностей течения металла при устранившемся процессе прокатки, а также при попадании в калибр задних концевых дефектов, полученных на предыдущем этапе раскатки гильзы в автоматическом стане, позволяет установить необходимые режимы настройки прокатного инструмента, а также определить минимальную величину технологических отходов трубы после раскатки концевых дефектов.

ГЛАВА 4. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ЭНЕРГОСИЛОВЫХ ПАРАМЕТРОВ ЛИНИИ ПРИВОДА ОБКАТНОГО СТАНА

Теоретическое исследование, представленное в настоящей работе, не будет в достаточной степени отражать реальную картину разрабатываемого процесса без практической верификации представленных результатов. С целью проверки зависимостей, полученных при математическом моделировании, представлен эксперимент, выполненный на реальном производстве на трубопрокатной установке ТПА-220. Экспериментальное исследование позволяет собрать необходимую информацию для определения реального уровня нагрузок линий привода валков обкатного стана с учётом многообразия действующих факторов для большинства типоразмеров труб и оценки динамических процессов.

Экспериментальное исследование включает описание объекта исследования, разработку методики, выбор, подготовку, монтаж технических средств измерений и эксперимент, выполняемый по определенной программе, а также обработку и анализ полученных результатов. Результаты исследования могут быть использованы для разработки рекомендаций по совершенствованию конструкций оборудования стана, а также по корректировке режимов деформации, калибровок инструмента и настройки стана.

4.1. Объект, методика и программа экспериментального исследования

Объектами экспериментального исследования являлись обкатные машины №1 и №2 в составе ТПА-220 цеха № 1 ПАО «ПНТЗ»: двухвалковые нереверсивные станы винтовой прокатки с групповым приводом валков. Кинематическая схема стана представлена на рисунке 1.1. Линия привода валков включает в себя следующие основные узлы:

- узел рабочего валка,

- шпиндельное устройство,
- комбинированный редуктор – шестерённую клетку с суммарным передаточным числом 4,73,
- моторную зубчатую муфту,
- главный электродвигатель П 143-4К.

Согласно технической документации на основное механическое и электротехническое оборудование для обоих обкатных станков установлены следующие предельные виды нагрузок для главного электродвигателя обкатного стана:

- тип – электродвигатель постоянного тока,
- марка электродвигателя – П2П-500 – 147 8УХЛУ,
- номинальная мощность – 500 кВт,
- номинальная частота вращения ротора двигателя – 310 об/мин,
- максимальная частота вращения ротора двигателя – 1000 об/мин,
- номинальное напряжение – 440 В,
- номинальный ток якорной цепи – 1 240 А,
- номинальный крутящий момент – 15,4 кН·м,
- максимальный ток якорной цепи (ток отсечки) – 1 920 А,
- кратность максимального тока – 1,50.

Для механической части привода автоматического стана:

- максимальный крутящий момент на выходных валах комбинированного редуктора – шестерённой клетки – 53,4 кН·м,
- максимальный крутящий момент, передаваемый двумя шпинделями (по ГОСТ 8059–74) – 144 кН·м.

Для оценки уровня нагруженности линии обкатной машины используется замер реального уровня нагрузок, снимаемого с электродвигателя машины, а также измерение деформации промежуточных элементов в линии привода при передаче вращения на рабочие валки.

Поставленные задачи экспериментального исследования решаются с определением комплекса регистрируемых величин и интервалов изменения параметров технологического процесса. Фактические нагрузки на линию привода валков обкатного стана регистрация с помощью записи следующих величин:

- тока якоря ($I_{я}$) главного электродвигателя стана,
- частоты вращения ротора ($n_{я}$) главного электродвигателя стана,
- крутящего момента (M_1), передаваемого универсальным шпинделем от комбинированного редуктора правому по ходу прокатки валку,
- крутящего момента (M_2), передаваемого универсальным шпинделем от комбинированного редуктора левому по ходу прокатки валку.

Указанные электрические параметры могут быть взяты для регистрации в неискажённом виде непосредственно от первичных штатных измерительных приборов, предусмотренных в схеме электропривода (шунтов).

Запись крутящих моментов в каждой из линий привода валков обкатного стана позволяет определить загрузку различных элементов этих линий (редуктора, шпинделей), изучить распределение крутящих моментов между линиями привода каждого из валков и оценить динамические процессы, возникающие при обкатке в данном оборудовании. В качестве объектов для непосредственного измерения деформации и дальнейшего преобразования измерений в данные о напряженном состоянии объектов линии привода выбраны универсальные шпиндели. Тензометрические измерения, как правило, выполняются на валах шпинделей. Выбор гладких участков шпинделей в линиях привода обусловлен удобством доступа к ним при монтаже и снятии показаний. Кроме того, это позволяет в дальнейшем путём сопоставления показаний разных элементов привода валков оценить динамику изменения крутящих моментов по различным звеньям привода.

Дополнительно для каждой партии или серии заготовок таблично фиксировались следующие параметры:

- марку сплава и номер серии,
- диаметр и длину исходной заготовки,
- размеры гильзы после прошивного стана,
- размеры черновой трубы после автоматического стана,
- размер калибра,
- диаметр и толщину стенки, получаемой на обкатном стане трубы,
- диаметр оправки,
- установку оправки относительно валков,
- угол подачи заготовки в валки,
- скоростной режим прокатки,
- температуру гильзы на выходе из прошивного стана,
- температуру трубы перед калибровочным станом.
- особые условия прокатки.

Экспериментальное исследование выполнялось с многочисленными повторениями, включающие варьирование марок сталей, деформируемых при различных температурно-скоростных условиях, а также изменение маршрутов прокатки. Регистрация нескольких маршрутов прокатки обеспечивает исследование процессов с различными диаметрами и толщинами стенки труб, подаваемых на обкатку при различных скоростных режимах, что способствует более глубокому анализу зависимости энергосиловых параметров процесса от производственных факторов.

Результаты, полученные в рамках данного исследования, сохраняются в виде массивов данных, регистрируемыми системами мониторинга работы электроприводов обкатного стана при различных температурных режимах прокатки, которые в дальнейшем могут быть подвергнуты обработке методами математической статистики в расчётных программах.

Принципиальная схема измерения и регистрации нагрузочных параметров, возникающих в линиях приводов рабочих валков обкатного стана ТПА-220 при прокатке, показана на рисунке 4.1.

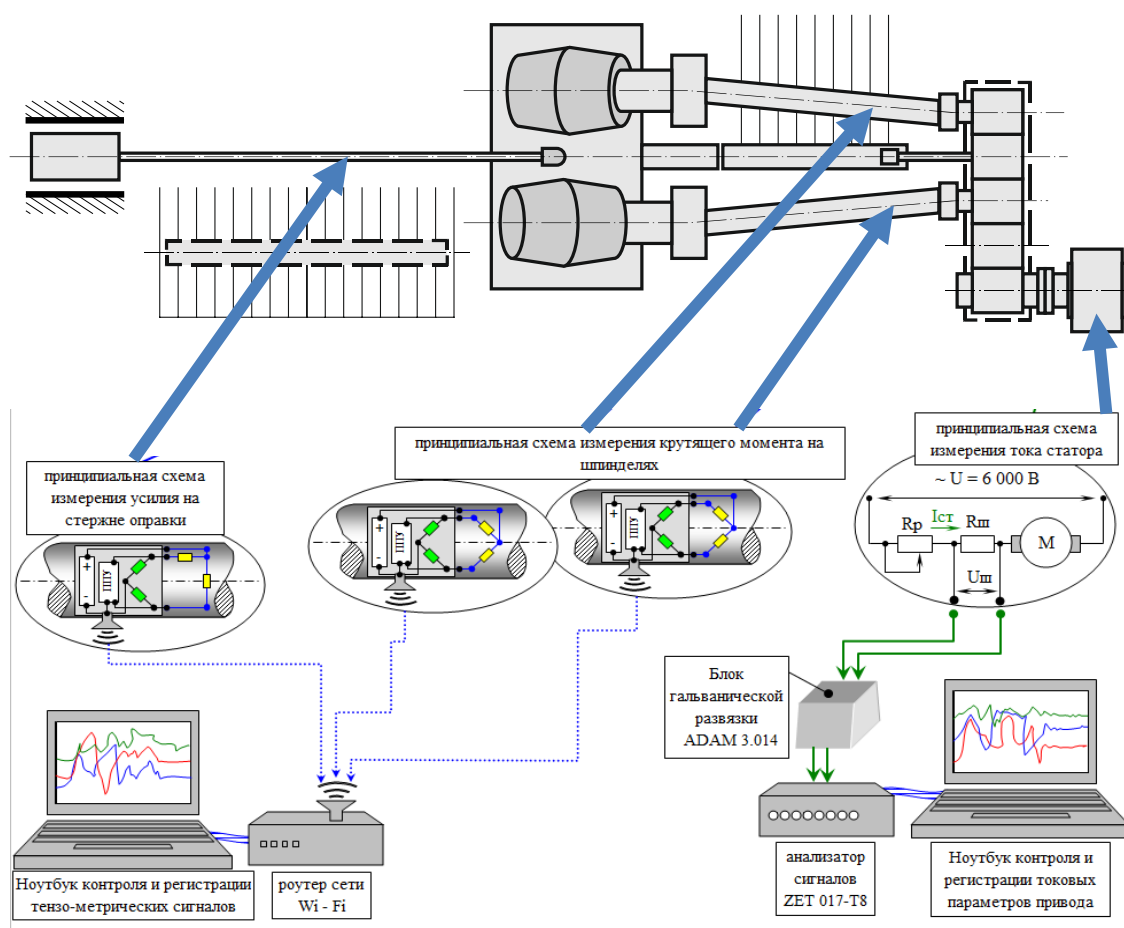


Рисунок 4.1 – Принципиальная схема измерений энергосиловых параметров на обкатном стане

Для регистрации параметров использовались две параллельно работающие схемы измерений, рассмотренные ранее:

- для регистрации токовых параметров электроприводов рабочих клеток,
- для регистрации сигналов датчиков крутящих моментов – беспроводная система передачи данных (БСПД).

Регистрация токов якорных цепей электродвигателей привода рабочих валков обкатного стана ($I_{я}$, $n_{я}$) производилась от контрольно-измерительных приборов, находящихся в машинном зале ТПА-220. Показания данных приборов, в свою очередь, являются прямыми сигналами, снимаемыми с шунтов якорных обмоток каждого из электродвигателей. Подключение сигнала к анализатору сигналов ZET 017-T8 производилось через блок гальванической развязки ADAM 3.014, что обеспечило как защиту измерительной схемы от

нештатных скачков напряжений, токов и потенциалов, так и исключение подачи случайного встречного напряжения в системы управления главными электродвигателями обкатного стана.

Для оценки динамики токовых нагрузок электродвигателей линий привода рабочих валков обкатного стана, запитанных постоянным током напряжением 440 В, такт опроса регистрируемого сигнала составлял 0,02 ... 0,04 с, что соответствует частоте 25 ... 50 Гц.

Измерение также крутящих моментов (M_1 , M_2) передаваемых шпинделями производились методом электротензометрии, обеспечивающим необходимую точность, надежность и воспроизводимость исследуемых параметров, хорошую чувствительность, малые габариты и линейность характеристики измерительных элементов, регистрацию динамических нагрузок, компенсацию температурных и иных погрешностей. Для записи крутящих моментов на гладком участке средней части шпинделей были размещены розетки тензорезисторов (полумостовая схема) из 2-х и 3-х датчиков ФК-20-100 соответственно и приемно-передающие блоки. Точки тензометрических измерений подключаются к устанавливаемым в приемно-передающих устройствах автономным блокам питания – аккумуляторов. Выходные сигналы тензорозеток направлялись к контроллерам приемно-передающих блоков и после оцифровки передавались по беспроводной сети Wi-Fi к роутеру и далее к ноутбуку. Для оценки динамики главной линии автоматического стана такт опроса основных энергосиловых параметров составлял 0,016 с.

Тарировка тензорезисторов и измерительных схем производилась по специальной методике на тарировочной балке равного сопротивления, результаты тарировки показывают достаточно высокую степень линейности показаний датчиков.

Марка стали, диаметр, длина прокатываемых труб и кратность резки исходной заготовки фиксировались по сопроводительной документации на каждую конкретную партию. Размеры исходной черновой трубы, диаметр калибра, диаметр оправки принимались в соответствии с фактической

настройкой прошивного, автоматического и обкатных станов и сопоставлялись с таблицей прокатки, являющейся приложением к технологической инструкции [86].

Специальные условия прокатки вносились по мере необходимости. Метрологическая поверка всего использованного измерительного оборудования производилась по методикам, принятым в УрФУ и ПАО «ПНТЗ». В ходе обследования оборудования автоматического стана ТПА-220 специальных методов планирования эксперимента не применялось в связи с наличием достаточно напряженной производственной программы цеха № 1 ПАО «ПНТЗ». В соответствии с планом выпуска продукции планировались серии замеров проводимых штатных технологических процессов для разных типоразмеров труб и марок сталей.

Программа исследования включала исследование маршрутов прокатки труб диаметрами 159 мм, 168,3 мм, 177,8 мм, 219 мм, 245 мм с различными толщинами стенок от 7 до 12 мм. Марочный состав сталей, наблюдавшихся в ходе работы, включает углеродистые и легированные стали (Сталь 20, 45, 09Г2С, 13ХФА, 15ХНМ, 30ХГМА, 37Г2Ф).

4.2 Обработка экспериментальных данных исследования

Полученные в ходе экспериментального исследования массивы цифровых данных были подвергнуты конвертации для дальнейшей визуализации результатов, учёта тарировочных коэффициентов по каждому из параметров, а также для представления информации в наиболее удобной для чтения, анализа и сопоставления форме.

Для расшифровки полученных результатов был разработан программный алгоритм, позволяющий представлять осциллограммы измерений в удобной для обработки форме. Данный алгоритм предусматривает выполнение следующих функций:

- идентификацию реальному маршруту прокатки соответствующего экспериментального массива данных,
- ввод табличных данных реального маршрута прокатки,
- конвертацию результатов экспериментального исследования в расчетную среду Microsoft Excel,
- поиск и фиксацию базовых (нулевых) значений параметров,
- получение значений регистрируемых величин с учетом чувствительности приборов и тарировочных коэффициентов относительно базовых (нулевых) значений параметров,
- построение графиков изменения регистрируемых параметров во времени для партии прокатываемых труб,
- определение типовых процессов нагружения и построение для них укрупненных диаграмм изменения во времени регистрируемых нагрузочных параметров для одной заготовки,
- построение для типовых процессов прокатки укрупненных диаграмм изменения во времени нерегистрируемых нагрузочных параметров как для одной заготовки, так и для партии труб – например, определение крутящих моментов в различных узловых точках линии привода по току главного электродвигателя,
- сопоставление результатов исследования, полученных различными экспериментальными методами (через токовые параметры главного электродвигателя и по показаниям тензорезисторов) между собой, а также с данными цеховой системы мониторинга токовых параметров электроприводов станов, входящих в технологическую цепочку ТПА-220,
- анализ полученных результатов и формирование выводов.

Полученные в результате исследования данные наиболее удобно представить в виде осциллограмм, показывающих изменение величин во времени. С учетом того, что процессы прокатки на обкатном стане реализуются

для разных сплавов, в широком диапазоне диаметров и в условиях отличающихся скоростных режимах работы электродвигателей для представления промежуточных результатов на основе проведенных измерений следует выбрать несколько характерных маршрутов.

В качестве примера типового анализа измерений на рисунках 4.2–4.5 представлены осциллограммы уровней нагружения главного электродвигателя и линий привода валков обкатного стана при раскатке черновых труб двух характерных типоразмеров:

- тонкостенная труба $\varnothing 245 \times 8,9$ мм из стали группы прочности Д (сталь 45)
- данный (целевой) маршрут является одним из наиболее нагруженных, так как осуществляется прокатка черновой трубы наибольшего диаметра с подъемом диаметра до 13 мм из стали, имеющей высокое сопротивление деформации, а сама прокатка происходит при скоростях, соответствующих 2-й зоне регулирования скорости электродвигателя (выше номинальной скорости),
- толстостенная труба $\varnothing 178,8 \times 9,2$ мм из стали группы прочности Е (сталь 37Г2Ф), для которой подъем диаметра может достигать 7 мм, что в купе с повышенной прочностью материала позволяет рассматривать данный маршрут в качестве проектного, особенно с учетом того, что он является востребованным для производства.

Анализ результатов исследования включал в себя качественный анализ, имевший целью определение основных, принципиальных особенностей процесса прокатки черновых труб на автоматическом стане ТПА-220, и количественный анализ, в результате которого получены основные соотношения между реальными энергосиловыми параметрами процесса и предельными уровнями загрузки оборудования.

На первом графике, показанном на рисунке 4.2, представлены осциллограммы токовых нагрузок электродвигателя, в том числе следующие величины:

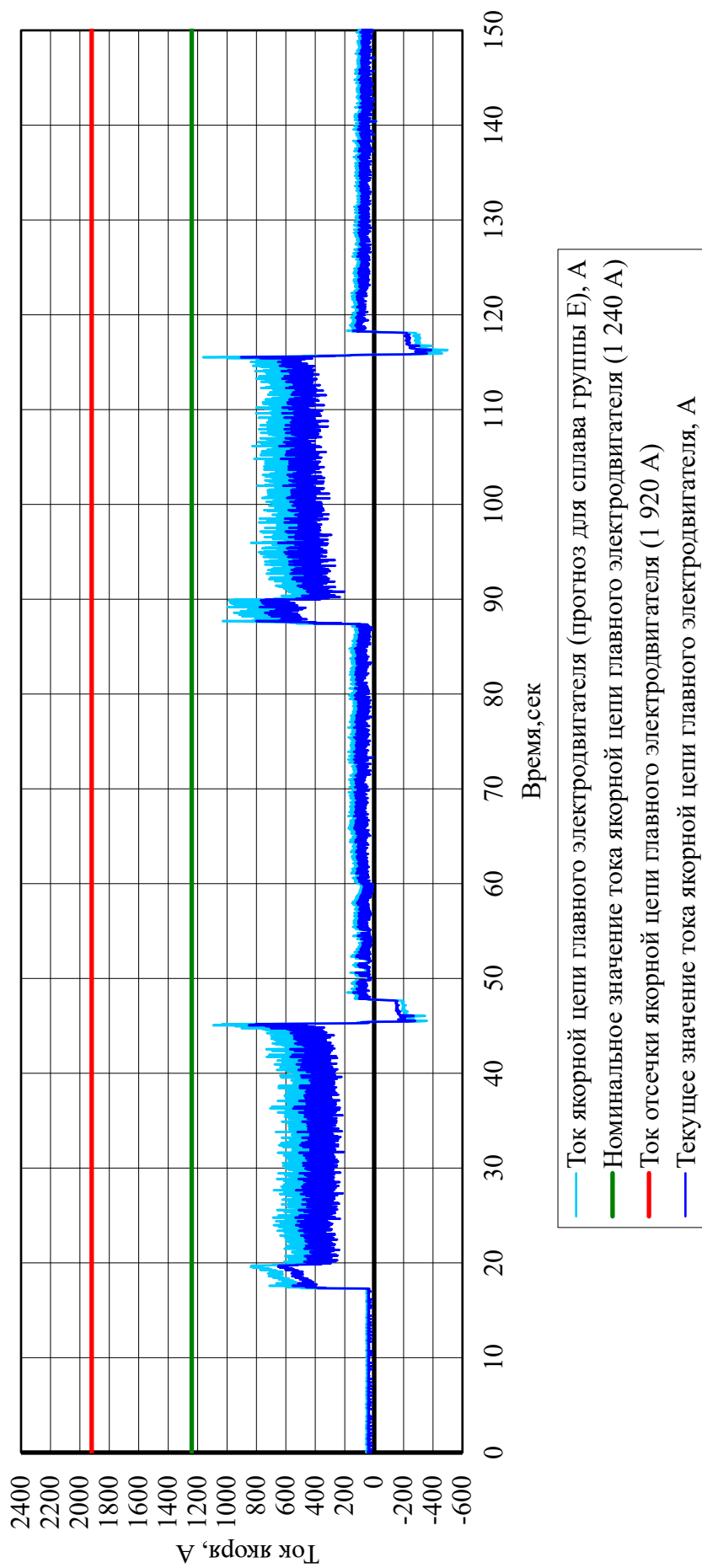


Рисунок 4.2 – Динамика токовых нагрузок якорной цепи главного электродвигателя стана при обкатке трубы 245×8,9 из стали 45 при температуре 1190...1210 °С

- номинальный ток якорной цепи главного электродвигателя обкатного стана согласно по технической характеристике $I_{ном} = 1\ 240\ А$,
- ток отсечки для якорной цепи главного электродвигателя обкатного стана по паспортным данным $I_{огр} = 1\ 920\ А$ (коэффициент перегрузки – 1,50),
- реальный ток якорной цепи главного электродвигателя обкатного стана при прокатке трубы из стали группы Д (синий цвет),
- прогнозное значение тока якорной цепи главного электродвигателя обкатного стана при прокатке трубы из стали группы Е (темно-бирюзовый цвет).

Оценка уровня нагруженности при обработке более прочных сплавов (стали группы Е) на имеющемся парке оборудования получена с использованием данных о механических свойствах прокатываемых сталей (см. 1 главу).

На следующем графике, представленном на рисунке 4.3, показана диаграмма частоты вращения ротора электродвигателя со следующими величинами:

- номинальная частота вращения ротора главного электродвигателя обкатного стана согласно по технической характеристике $n_{ном} = 310$ об/мин,
- максимальная частота вращения ротора главного электродвигателя обкатного стана согласно по технической характеристике $n_{ном} = 1000$ об/мин,
- реальная частота вращения ротора главного электродвигателя обкатного стана при прокатке трубы из стали группы Д.

Аналогичные зависимости получены и выведены в качестве осциллограмм для другого маршрута и представлены на рисунках 4.4 и 4.5. Для удобства применения экспериментальных измерений с целью прогнозирования нагрузок, возникающих в процессе обкатки труб после автоматического стана в линии ТПА, воспользуемся известными методиками [87-92] представлений момента прокатки, полученного пересчетом токовых нагрузок с якоря электродвигателя.

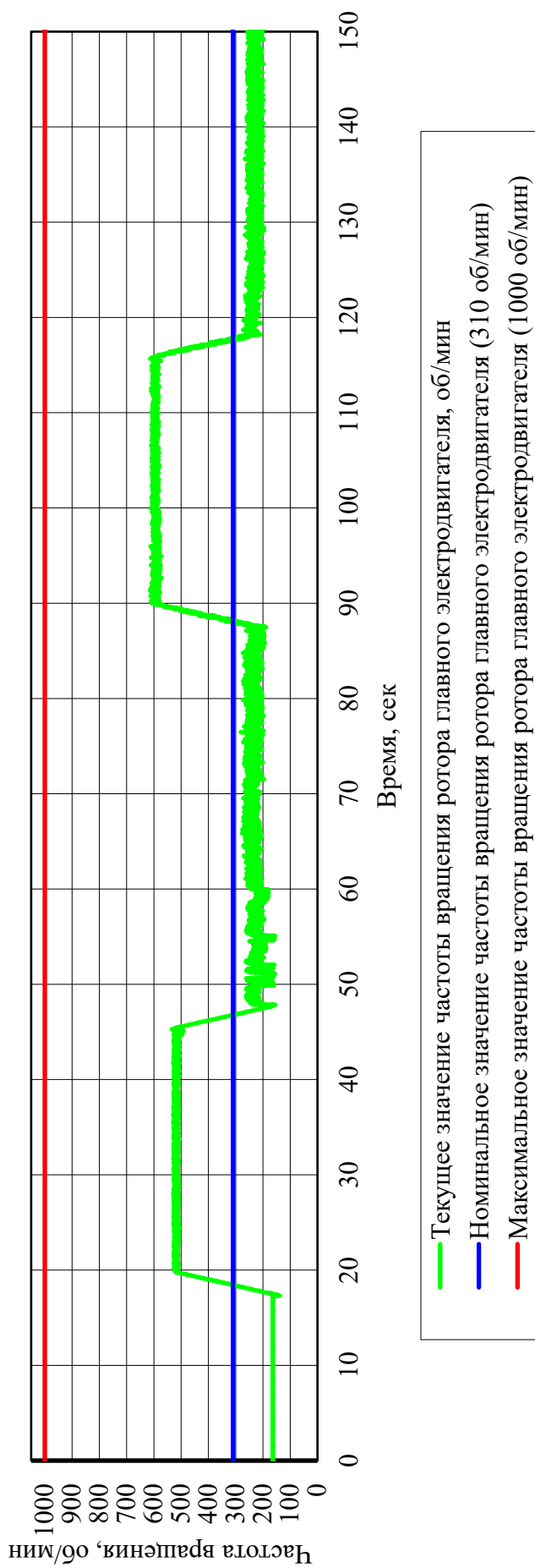


Рисунок 4.3 – Динамика частоты вращения ротора главного электродвигателя стана при обкатке трубы 245×8,9 из стали 45 при температуре 1190...1210 °С

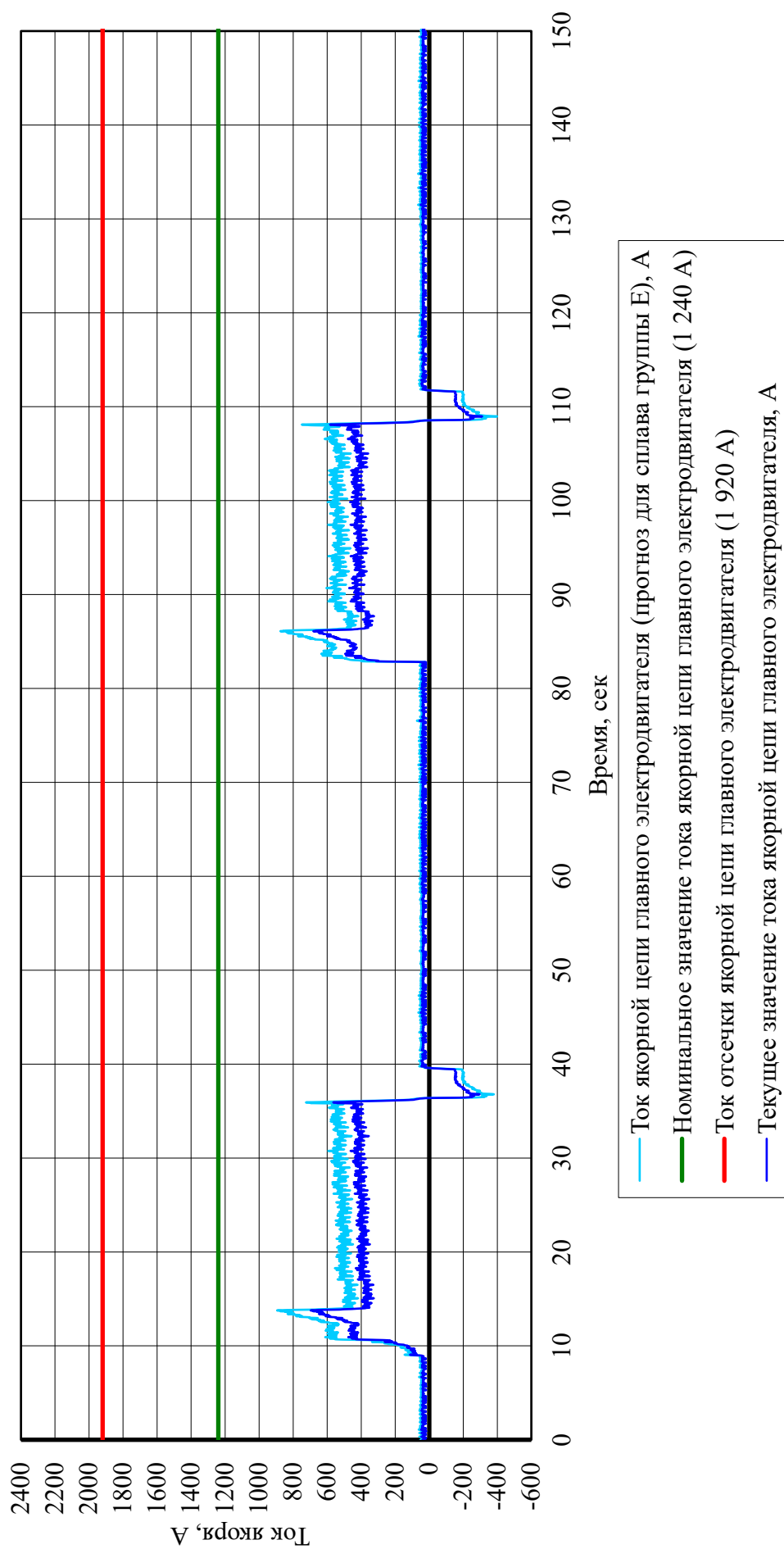


Рисунок 4.4 – Динамика токовых нагрузок якорной цепи главного электродвигателя стана при обкатке трубы 178,8×9,2 из стали 3ГГ2Ф при температуре 1190...1210 °С

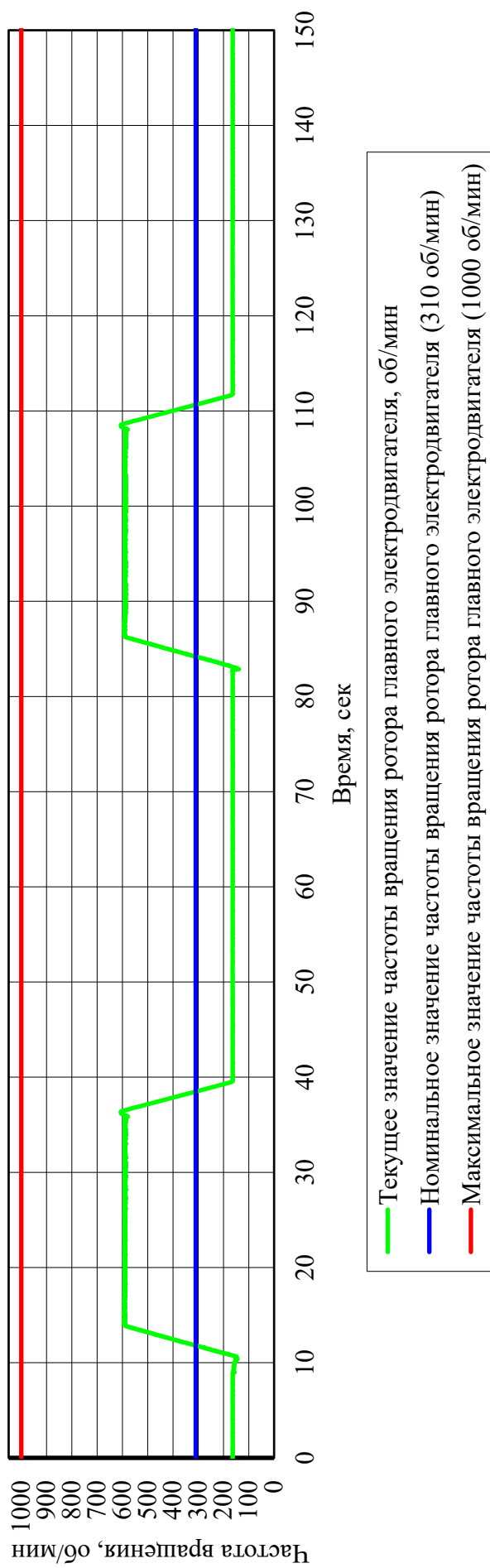


Рисунок 4.5 – Динамика частоты вращения ротора главного электродвигателя стана при обкатке трубы 178,8×9,2 из стали 37Г2Ф при температуре 1190...1210 °С

На рисунках 4.6 и 4.7 приведены графики моментов на электродвигателях для маршрутов прокатки труб для трубы $\varnothing 245 \times 8,9$ мм из стали 45 и $\varnothing 178 \times 9,2$ мм из стали 37Г2Ф соответственно с учетом роста нагрузок при переходе на прокатку более высокой группы прочности.

Построенные по току главных электродвигателей обкатного стана графики крутящих моментов в линиях привода валков для двух рассматриваемых маршрутов прокатки позволяют сопоставить их уровень с допускаемыми значениями для различных элементов данных линий.

Для удобства анализа уровней нагруженности на данных графиках также расположены предельные уровни нагрузок для соответствующих узлов (см. параграф 2.1):

- максимальный длительно действующий крутящий момент на выходе редуктора – 53,4 кН·м (5,4 тс·м),
- максимальный длительно действующий крутящий момент, передаваемый шпинделями – 144,0 кН·м (14,7 тс·м).

Как видно из расчетных графиков моменты, действующие на электродвигатель обкатных машин, не остаются постоянными в процессе прокатки, тем не менее имеются закономерности в каждом из проходов, которые можно проанализировать. Также, с учетом прокатываемого на трубопрокатной установке ТПА-220 сортамента труб в большинстве своем нагрузки на линии привода оказываются значительно ниже и имеют достаточный запас для наиболее «слабых» звеньев рабочей линии стана (от 2,58 до 6,95 для экстремальных значений).

Рассмотрим подробнее процесс обкатки в каждом проходе, который можно разделить в обоих случаях на три участка: захват заготовки, установившийся режим и выход заготовки из клетки. Динамика крутящих моментов в линии привода стана при обкатке одной заготовки показана на рисунках 4.8 и 4.9.

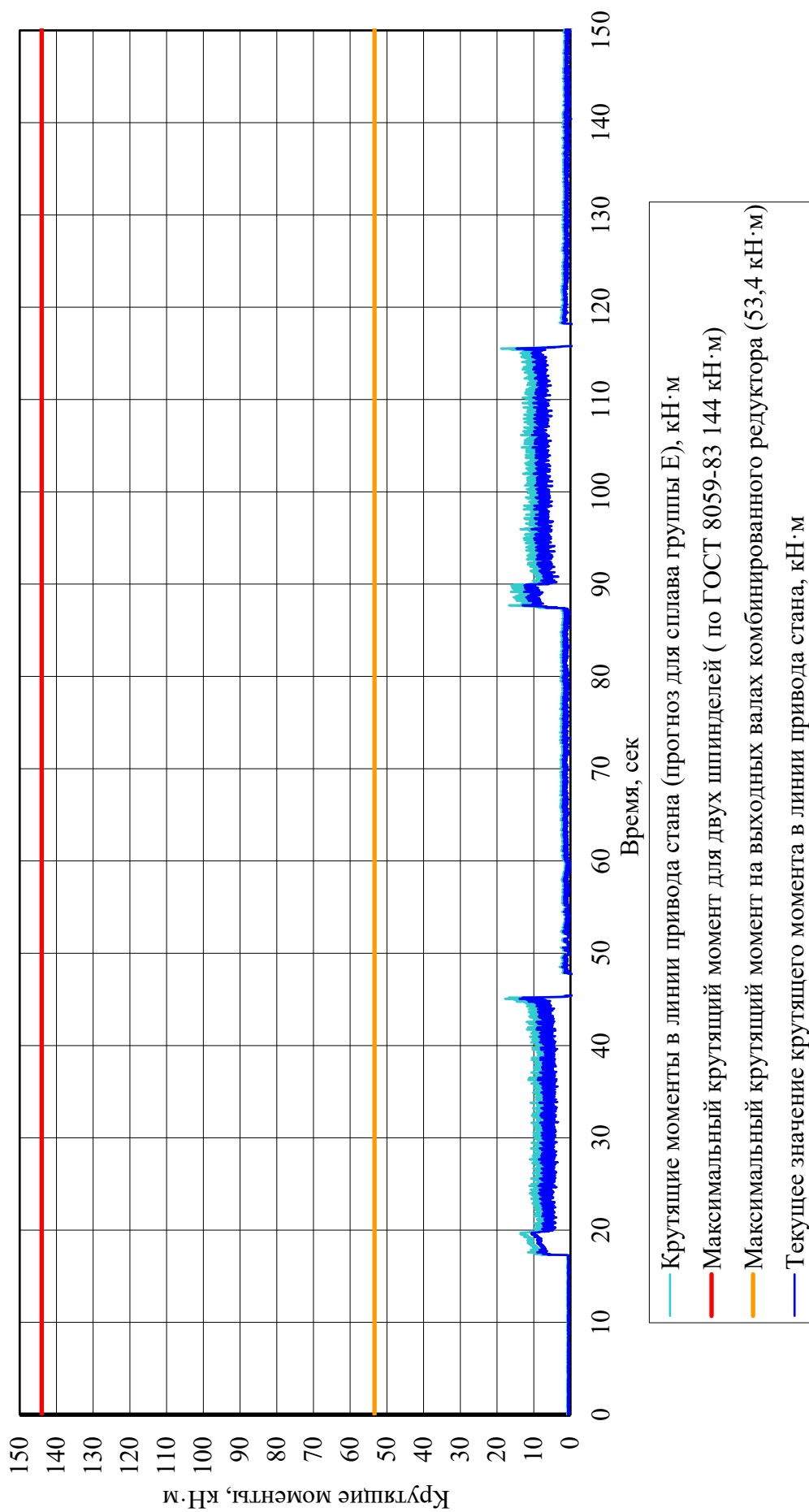


Рисунок 4.6 – Динамика крутящих моментов в линии привода стана при обкатке трубы 245×8,9 из стали 45 при температуре 1190...1210 °С

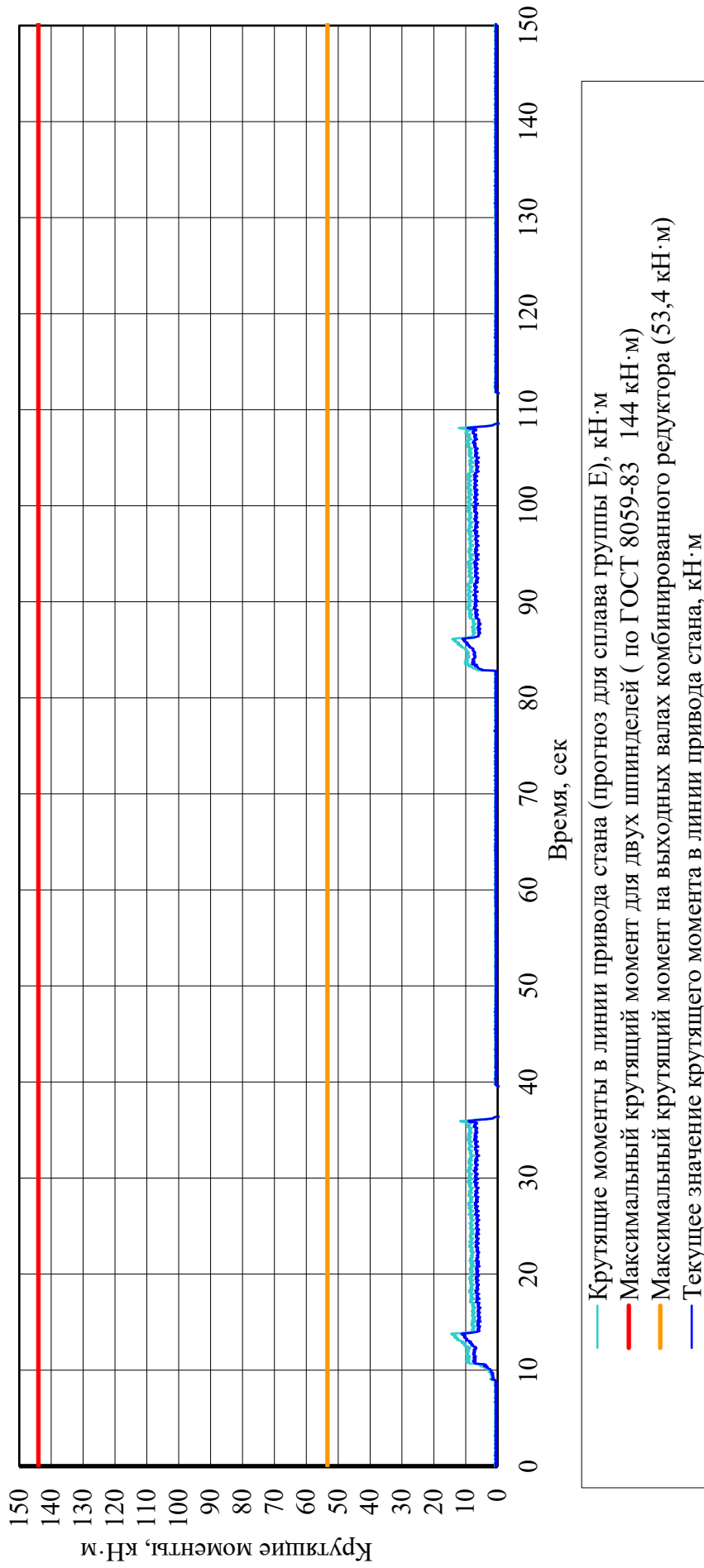


Рисунок 4.7 – Динамика крутящих моментов в линии привода стана при обкатке трубы 178,8×9,2 из стали 37Г2Ф при температуре 1190...1210 °С

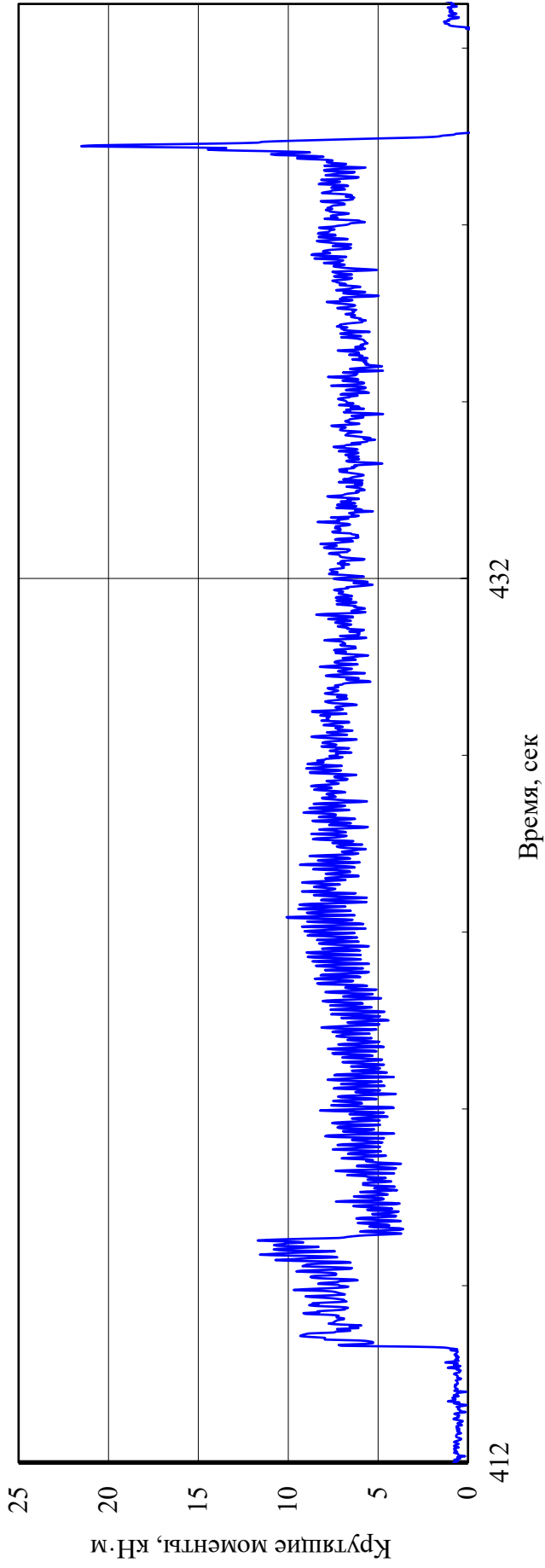


Рисунок 4.8 – Динамика крутящих моментов в линии привода стана при обкатке трубы $245 \times 8,9$ из стали 45 при температуре $1190 \dots 1210$ °С (для одной заготовки)

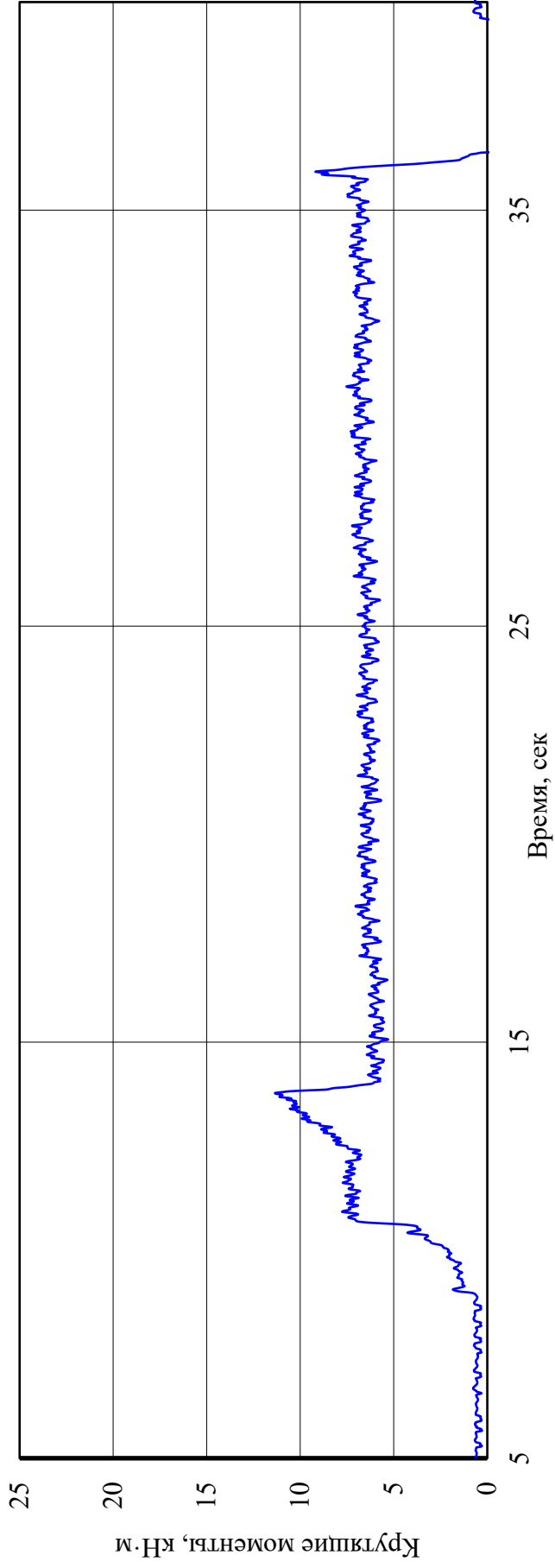


Рисунок 4.9 – Динамика крутящих моментов в линии привода стана при обкатке трубы 178,8×9,2 из стали 37Г2Ф при температуре 1190...1210 °С (для одной заготовки)

Судя по осциллограммам, при прокатке возникают пиковые нагрузки на входе и на выходе заготовки в клеть. Всплеск, наблюдаемый при начале процесса, объясняется работой двигателя на повышенных оборотах, превышающих номинальную скорость, что приводит к сложностям при захвате заготовки. Например, при проходе трубы $\varnothing 245 \times 8,9$ мм из стали 45 значение момента увеличивается на 74% относительно последующей стационарной стадии раскатки, а для трубы $\varnothing 178 \times 9,2$ мм из стали 37Г2Ф момент возрастает при захвате трубы на 76%. При установившемся режиме имеют место осцилляции в пределах 15% с определенным тактом, что может свидетельствовать о попадании в очаг деформации клетки заготовки с заданной толщиной стенки, повторяющей калибр валков и оправки автоматического стана. Имея в виду, что $D/S = 27,5$ для $\varnothing 245$ мм и $D/S = 19,4$ для $\varnothing 178$ мм можно утверждать, что характер энергосиловых параметров будет отличаться в связи с различиями в геометрии заготовки и настройки стана. При прокатке трубы $\varnothing 245$ частота осцилляций составляет примерно 10 с^{-1} , а при прокатке трубы $\varnothing 178$ – 4 с^{-1} . В завершении цикла прокатки в обоих случаях имеет место хорошо наблюдаемый скачкообразный рост усилия. В случае более толстой стенки ($D/S < 20$ для $\varnothing 178$ мм) пик составляет 43% от средних значений, замеренных при установившемся режиме. При рассмотрении обкатки труб с более тонкой стенкой ($D/S = 27,5$ для $\varnothing 245$ мм) данная разница становится более значительной, пик при выходе заготовки из клетки превышает значения, замеренные в установившемся режиме, в 3,1 раза. Наличие пиков в обоих случаях подтверждает гипотезу о влиянии продольных дефектов на выходном конце трубы на энергосиловые параметры процесса и нагруженность силовых элементов и рабочих привода оборудования трубопрокатной установки.

Наряду с токовыми выполнялись тензометрические измерения крутящих моментов на элементах линии привода обкатной машины. Пересчет практических измерений на крутящие моменты поможет не только верифицировать экспериментальные замеры на шунтах главного привода, но и определить распределение нагрузок между валками обкатной клетки. Для

иллюстрации результатов выполненных измерений на рисунках 4.10, 4.11 представлены типовые осциллограммы крутящих моментов на шпинделе, полученные с использованием розеток тензорезисторов и беспроводной системы передачи данных также для маршрута прокатки труба 245×8,9 сталь ДБ.

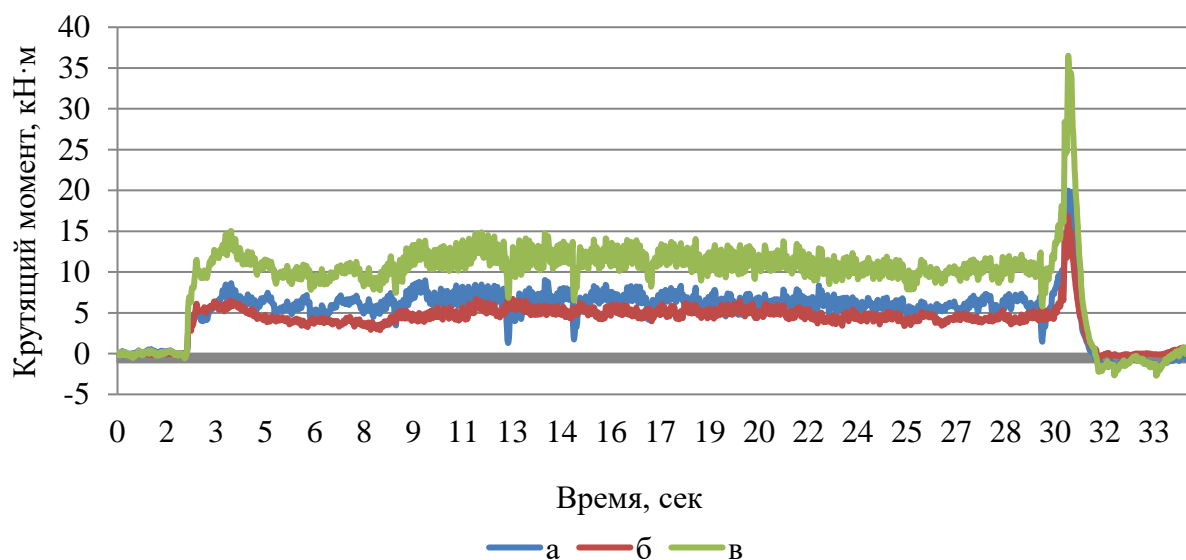


Рисунок 4.10 – Динамика крутящих моментов на шпинделе обкатной машины №1:
а – на 1-ом шпинделе; б – на 2-ом шпинделе; в – суммарный момент

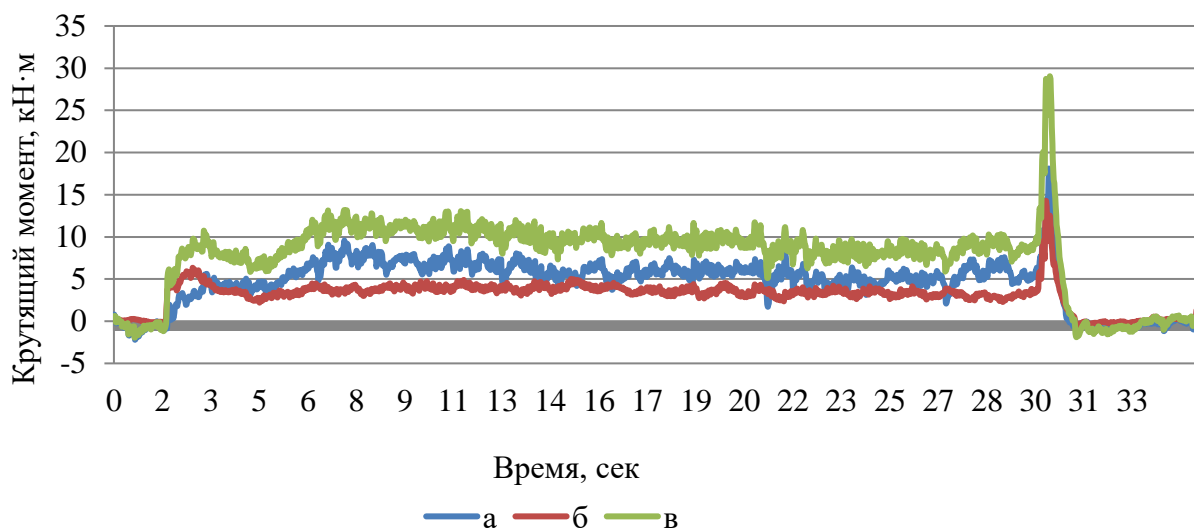


Рисунок 4.11 – Динамика крутящих моментов на шпинделе обкатной машины №2:
а – на 1-м шпинделе; б – на 2-ом шпинделе; в – суммарный момент

Как видно из графиков, характер прокатки тонкостенных труб повторяет поведение момента на роторе электродвигателя привода: некоторые девиации в

начале процесса, связанные с захватом заготовки, установившийся режим с минимальными колебаниями и всплеск в конце цикла прокатки. Среднее значение крутящего момента на шпинделях составляет 9,36...11,07 кН·м, в то время как пиковые значения достигают 29...36 кН·м за промежуток времени 2,5...3 с.

Отдельное внимание стоит уделить неравномерности распределения моментов между шпинделями. В процессе обкатки один из шпинделей оказывается более нагруженным, чем другой. Разница между средними значениями моментов в установившихся режимах составляют 1,3...1,6 раза. При рассмотрении максимальных значений установившегося режима прокатки значения могут быть ещё больше: до 1,2...2 раз, что скажется на неравномерном и предельном нагружении зубчатых передач группового привода валков.

Неравномерность также сказывается на осцилляциях, возникающих при прокатке заготовки. Более нагруженный шпиндель имеет больший разброс значений (достигающий 3,9 кН·м), в то время как другой шпиндель испытывает меньшие колебания значений (в пределах 1,6 кН·м). Также пиковые значения, которые испытывает более нагруженный шпиндель, превышают аналогичные на менее нагруженном на 4...15%, однако, за счёт меньших номинальных значений превышают средние значений момента в установившемся режиме на 65...68% и 71...74% соответственно для 1-ого и 2-ого шпинделей.

По итогам экспериментальных замеров можно сделать несколько выводов с точки зрения нагруженности элементов обкатной станы. В частности, прокатка трубы $\text{Ø}244,5 \times 8,9$ мм из стали группы прочности Е будет происходить в условиях роста сопротивления металла деформациям и в целом энергосиловых параметров процесса на следующих уровнях по отношению к аналогичным процессам для сплавов группы Д в 1,284 раза.

При прокатке трубы диаметром 245 мм из сталей группы прочности Е уровень нагрузок возрастёт в среднем на 28,4%, относительно энергосиловых параметров, наблюдаемых для сталей группы прочности «Д». Кроме того, даже незначительные отклонения от штатного протекания технологического процесса

(паузы, отклонения геометрических размеров и т.п.) будут приводить к перегрузке за счёт охлаждения трубы и, следовательно, повышении сопротивления деформации (увеличение до 15%). Как показывает теоретическая оценка, возрастание коэффициента напряженного состояния также как и на автоматическом стане составляет всего 3%. Возрастание нагрузки вследствие дополнительного снижения температуры, с учётом времени транспортировки гильзы и величины уменьшения толщины стенки гильзы (с 14 до 13 мм в соответствии с таблицей прокатки и черновой трубы с 9 до 8 мм) не должно превышать 10%.

Повышение тока отсечки возможно только совместно с мероприятиями по усилению передающей способности комбинированного редуктора – шестеренной клетки.

Уже при существующем сортаменте, включая типоразмеры 245×8,9 и 219×9 из сплавов группы Д и стали 20 соответственно, отклонения от технологически обоснованных режимов настройки и размеров прокатного инструмента приводят к превышению фактических напряжений в зубчатых передачах над допускаемыми значениями. При прокатке труб 245×7,9 из сплавов группы Е на обкатных станах расчетные нагрузки дополнительно возрастут на 28%, что потребует замены существующих зубчатых передач первой быстроходной и двух последних ступеней на передачи повышенной твердости.

На обкатных станах ток якорной обмотки главного электродвигателя превысит на 10...20% уровень отсечки (1 920 А) при прокатке заднего конца трубы с одной или несколькими складками. Учитывая кратковременность перегрузки в связи с прокаткой заднего конца трубы со складками и длительно действующий ток невысокого уровня при установившемся процессе обкатки, а также существенные паузы, перегрева главного электродвигателя не будет. Его загрузка по среднеквадратичному току составит всего 25% номинального тока.

Сопоставление уровней загрузки главного электропривода и наиболее нагруженной линии комбинированного редуктора – шестеренной клетки показывает, что перегрузка происходит практически одновременно (чуть раньше

перегрузка возникает по току). Повышение тока отсечки возможно только совместно с мероприятиями по усилению передающей способности комбинированного редуктора – шестеренной клетки.

Как видно при уменьшении соотношения D/S происходит сглаживание пиковой нагрузки, что говорит в пользу гипотезы о влиянии заднего продольного дефекта на рост энергосиловых параметров процесса.

В дальнейшем полученные результаты проходили процедуру статистической обработки в соответствии со стандартными методиками [93]. Основные результаты экспериментальных измерений приведены в таблице 4.1.

4.3 Проверка адекватности данных математической модели

В качестве следствий анализов результатов экспериментального исследования можно выделить проверку адекватности разработанной математической модели реальным условиям деформирования трубной заготовки в очаге деформации, а также обобщение результатов экспериментального исследования путем выработки зависимостей, позволяющих осуществлять прогнозную оценку энергосиловых параметров процесса от достаточно широкого диапазона параметров настройки стана.

Наиболее существенным фактором, оказывающим влияние на величину энергосиловых параметров, является сопротивление металла деформации [67]. Ввиду относительно низких показателей деформирования черновой трубы в обкатном стане, для упрощения анализа будет удобнее отказаться от рассмотрения зависимости сопротивления деформации, как функции трех переменных и ограничиться зависимостью деформации от температуры. При этом степень и скорость деформации рассматриваются постоянными и равными (на основании расчета, представленном в табл. 4.1): $\varepsilon = 0,05$ и $\dot{\varepsilon} = 5 \text{ с}^{-1}$.

На основании данных, приведённых в параграфе 1.4, выделим значения, соответствующие сортаменту труб, входившему в охват экспериментального измерения. Результаты приведены в таблице 4.2.

Таблица 4.1 – Обработка результатов экспериментального исследования методами математической статистики

Размер трубы	Марка стали	D/S	Число заготовок	Коэффициент вытяжки, λ	Степень деформации, ε	Математическое ожидание			Доверительные интервалы	
						М уст, кН·м	М пик, кН·м	М пик / М уст	М уст, кН·м	М пик, кН·м
159×12	09Г2С	13,25	25	0,97	0,03	13,88	22,00	1,59	0,48	1,17
159×12	Сталь 20	13,25	13	0,97	0,03	14,05	20,24	1,44	0,34	0,92
159×10	15Х5Н	15,90	9	0,96	0,05	10,33	18,81	1,84	0,61	1,37
168,3×10,39	30ХГМА	16,20	22	0,96	0,04	12,91	21,60	1,68	1,08	1,81
219 × 12	Сталь 45	18,25	26	0,96	0,04	11,99	26,47	2,22	0,29	1,08
219 × 12	Сталь 20	18,25	12	0,96	0,04	11,99	26,47	2,22	0,29	1,08
177,8 × 9,2	37Г2Ф	19,33	63	0,99	0,01	9,29	16,39	1,78	0,29	0,29
219 × 10	Сталь 20	21,90	30	0,96	0,04	10,03	27,66	2,79	0,57	1,85
159×7	09Г2С	22,71	10	0,96	0,05	12,03	18,76	1,57	0,60	0,86
219 × 9	сталь 20	24,33	22	0,96	0,04	11,03	29,22	2,65	0,12	1,34
219 × 9	09Г2С	24,33	11	0,96	0,04	13,12	33,48	2,55	0,47	3,44
219 × 8,5	09Г2С	25,76	12	0,96	0,04	11,89	39,27	3,36	1,05	4,16
219 × 8	сталь 20	27,38	32	0,96	0,04	11,52	46,55	4,14	0,54	2,85
219 × 8	13ХФА	27,38	48	0,96	0,04	13,06	37,40	2,86	0,24	3,12
245×8,9	сталь 45	27,53	47	0,99	0,01	9,19	32,16	3,59	0,28	3,38

Таблица 4.2 – Механические свойства материалов трубных заготовок

Типоразмер трубы, мм	Марка стали	σ_s , МПа					
		1150 °C	1100 °C	1050 °C	1000 °C	950 °C	900 °C
159×7 159×12 219×8,5 219×9	09Г2С	44,2	50,6	57,9	66,3	75,9	86,9
159×12 219×8 219×9 219×10 219×12	20	43,0	49,4	57,8	65,3	75,0	86,3
159×10	15Х5Н	57,0	66,0	76,0	89,0	103	119
168,3×10,39	30ХГМА	50,0	58,0	67,0	77,0	89,0	103
219×12	45	43,0	49,4	56,8	65,3	75,0	86,3
177,8×9,2	37Г2Ф	53,7	62,5	72,6	84,4	98,1	114,1
219×8	13ХФА	58,3	65,3	73,2	82,0	91,9	102,9
245×8,9	45 (ДБ)	44,7	51,8	66,0	69,5	80,5	93,2

Введем приведенную величину условного крутящего момента, находящегося как отношение момента прокатки, полученного пересчетом токовых нагрузок, снятых с якоря электродвигателя, к сопротивлению деформации материала заготовки при выбранных деформационно-скоростных характеристиках и температуре заготовки:

$$M = \frac{M_B}{\sigma_s}, \quad (4.1)$$

где M_B – математическое ожидание момента прокатки, полученное в результате статистической обработки эксперимента, кН·м.

Для удобства применения экспериментальных измерений с целью прогнозирования нагрузок воспользуемся известными методиками представлений как зависимость от нескольких параметров процесса. Предварительный анализ показал, что наиболее адекватным является

использование линейной зависимости, в связи с чем условный крутящий момент можно выразить следующим уравнением:

$$M = j \cdot D + k \cdot \Delta D + l \cdot S + m, \quad (4.2)$$

где j, k, l, m – неизвестные постоянные, которые необходимо вычислить;

D, S – номинальные диаметр и толщина стенки готовой трубы, мм;

ΔD – «подъем» диаметра трубы при обкатке, мм.

Данное уравнение может быть составлено n раз (где n – общее количество заготовок). В результате с учетом того, что количество уравнений превышает количество неизвестных, необходимо подобрать такой набор коэффициентов, при котором решение попадало бы в имеющиеся доверительные интервалы. С этой целью выполним анализ отклонений регрессионных зависимостей от экспериментальных данных, используя метод наименьших квадратов [94]:

$$\sum_{i=1}^n (M_i - j \cdot D_i - k \cdot \Delta D_i - l \cdot S_i - m)^2 \rightarrow \min, \quad (4.3)$$

где i – порядковый номер заготовки.

Анализируя уравнение (4.3) на локальные экстремумы и вычисляя частные производные по неизвестным коэффициентам уравнения (4.2), получим систему линейных алгебраических уравнений (СЛАУ):

$$\left\{ \begin{array}{l} \left(\sum_{i=1}^n D_i^2 \right) \cdot j + \left(\sum_{i=1}^n D_i \cdot \Delta D_i \right) \cdot k + \left(\sum_{i=1}^n D_i \cdot S_i \right) \cdot l + \left(\sum_{i=1}^n D_i \right) \cdot m = \sum_{i=1}^n M_i \cdot D_i \\ \left(\sum_{i=1}^n D_i \cdot \Delta D_i \right) \cdot j + \left(\sum_{i=1}^n \Delta D_i^2 \right) \cdot k + \left(\sum_{i=1}^n \Delta D_i \cdot S_i \right) \cdot l + \left(\sum_{i=1}^n \Delta D_i \right) \cdot m = \sum_{i=1}^n M_i \cdot \Delta D_i \\ \left(\sum_{i=1}^n D_i \cdot S_i \right) \cdot j + \left(\sum_{i=1}^n \Delta D_i \cdot S_i \right) \cdot k + \left(\sum_{i=1}^n S_i^2 \right) \cdot l + \left(\sum_{i=1}^n S_i \right) \cdot m = \sum_{i=1}^n M_i \cdot S_i \\ \left(\sum_{i=1}^n D_i \right) \cdot j + \left(\sum_{i=1}^n \Delta D_i \right) \cdot k + \left(\sum_{i=1}^n S_i^2 \right) \cdot l + N \cdot m = \sum_{i=1}^n M_i \end{array} \right. \quad (4.4)$$

Так как имеет место ограниченное количество уравнений с 4 неизвестными наиболее доступным способом решения СЛАУ будет метод Гаусса, реализованный с помощью программного алгоритма Excel.

Таким образом, окончательная зависимость для моментов прокатки по результатам экспериментального исследования имеет следующий вид:

$$M_A^e = \frac{\sigma_S}{1000} (\alpha \cdot D + \beta \cdot \Delta D + \gamma \cdot S + \chi), \text{ кН}\cdot\text{м} \quad (4.5)$$

где M_A^e – аппроксимированная величина момента прокатки по результатам эксперимента, кН·м.

Используя описанную выше методику, получим постоянные коэффициенты зависимости для стационарной стадии обкатки:

$$\alpha = -0,297;$$

$$\beta = 5,90;$$

$$\gamma = 3,68;$$

$$\chi = 155$$

при диапазоне отклонений от $-15,4\%$ до $+12,28\%$.

Окончательно: $M_A^e = \frac{\sigma_S}{1000} (155 - 0,297 \cdot D + 5,90 \cdot \Delta D + 3,68 \cdot S)$ при коэффициентах корреляции $R = 0,81$ и $R^2 = 0,66$.

Выполним оценку влияния настроечных параметров процесса на расчетную величину момента. Для это ввиду малых деформаций, совершаемых при обкатке, и согласно таблице 4.1 выберем следующие диапазоны параметров: $\sigma_S = 70$ МПа; $D = 159 \dots 245$ мм; $S = 8 \dots 16$ мм и $\Delta D = 4 \dots 8$ [19].

Графики, полученные по результатам подстановки, приведены на рисунке 4.12.

Как видно, в целом все графики имеют тенденцию к снижению момента прокатки, который объясняется увеличением тонкостенности сечения трубы (при постоянной толщине стенки и увеличении наружного диаметра). В результате податливость сечения пластической деформации возрастает, что приводит к снижению нагрузки для ее совершения. Так максимальные значения, полученные для наиболее толстой в рассматриваемом диапазоне стенки 16 мм, снижаются от 14,9 кН·м до 13,1 кН·м на 12%. С увеличением толщины стенки значения возрастают пропорционально. Так возрастание стенки от 8 до 16 мм

приводит к росту моментов от 12,9 кН·м до 15 кН·м при диаметре 159 мм и от 11,1 кН·м до 13,2 кН·м при диаметре 245 мм.

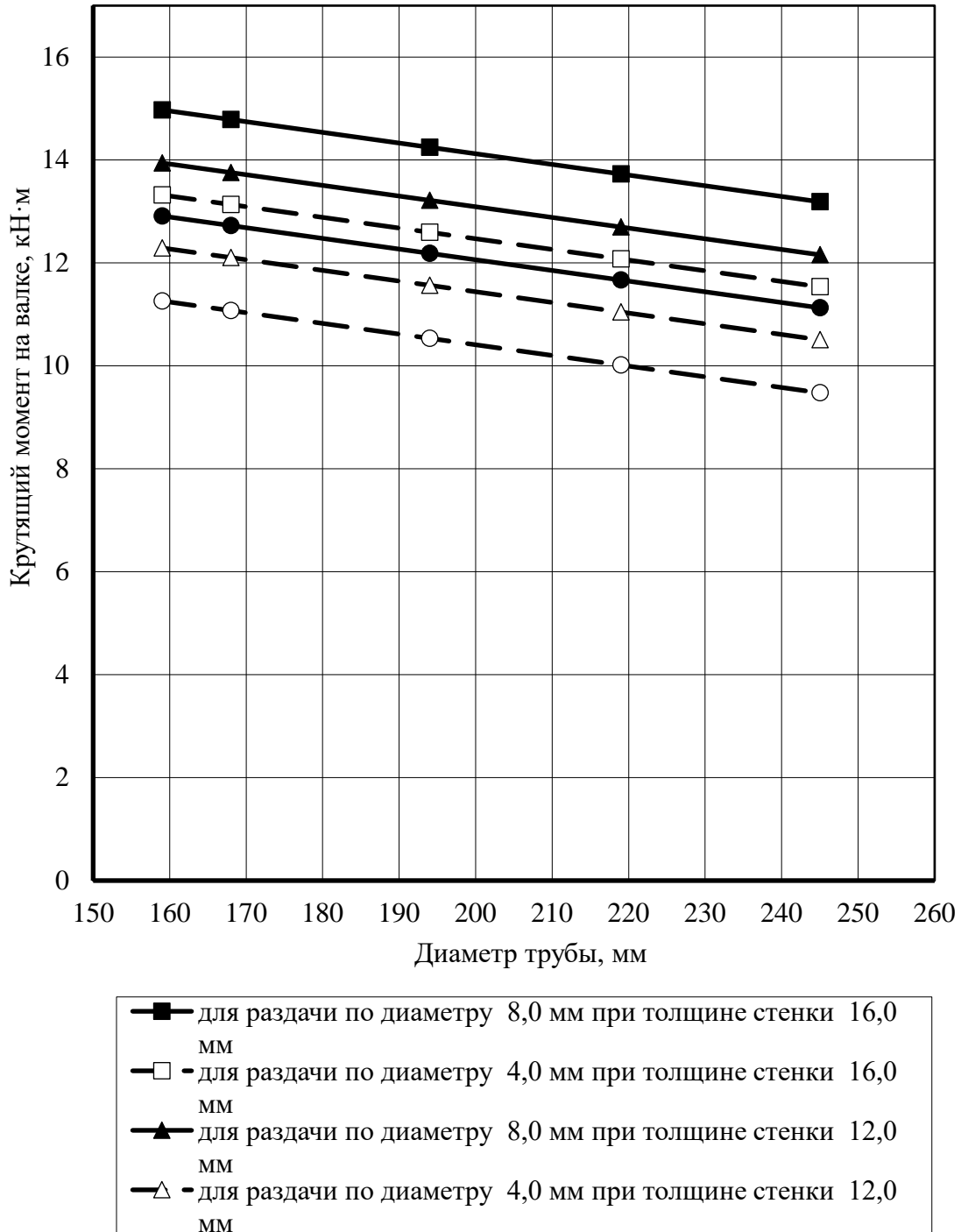


Рисунок 4.12 – Зависимости крутящего момента на валке обкатного стана для установившегося режима прокатки в зависимости от входных параметров процесса риллингования труб по данным эксперимента при сопротивлении металла деформации 70 МПа

При увеличении раздачи трубы по диаметру значения момента тоже возрастает (за счет увеличения степени деформации). Минимальные значения наблюдаются на максимальном диаметре (245 мм) при наименьшей толщине стенки (8 мм) трубы, обрабатываемой с минимальным подъемом диаметра (4 мм). По сравнению с максимальными значениями они снижаются не менее чем на 16%.

Выполним аналогичные операции обработки экспериментальных значений для пиковых нагрузок. Записанная в той же форме зависимость примет следующий вид:

$$M_{Amax}^e = \frac{\sigma_s}{1000} (2,75 \cdot D + 19,7 \cdot \Delta D - 13,7 \cdot S - 138) \quad (4.6)$$

при коэффициентах корреляции $R = 0,81$ и $R^2 = 0,65$ и диапазоне отклонений от -23,22% до +27,26%.

Построенные по формуле (4.6) зависимости представлены на рисунке 4.13.

Данный набор зависимостей имеет характер, обратный предыдущим, так как потеря устойчивости, приводящая к пиковым нагрузкам более свойственна для тонкостенных труб, и, следовательно, рост данного показателя значительно влияет на момент прокатки. Максимальные значения получены для толщины стенки 8 мм, для которого изменение отношения D/S от 20 до 30 приводит к возрастанию пиковых значений момента от 24,3 кН·м до 40,8 кН·м (на 68%). Увеличение толщины стенки повышает жесткость сечения, снижая тем самым потерю устойчивости заднего конца трубы и величину концевых дефектов, подвергаемых раскатке. Рост толщины стенки от 8 мм до 16 мм вызывает падение момента прокатки на 32% в начале рассматриваемого диапазона диаметров и на 19% в его конце. Величина раздачи по диаметру прямо пропорционально связана с ростом значений моментов. В рассматриваемом диапазоне возможных значений трубы с максимальной толщиной стенки (16 мм) при минимальном подъеме диаметра (4 мм) в процессе обкатки имеет значения, полученные для рассматриваемого интервала диаметров, ниже на 54% в его начале и на 32% в его завершении по сравнению со значениями, полученными

для труб с наименьшей толщиной стенки (8 мм) и при максимальной раздате (8 мм).

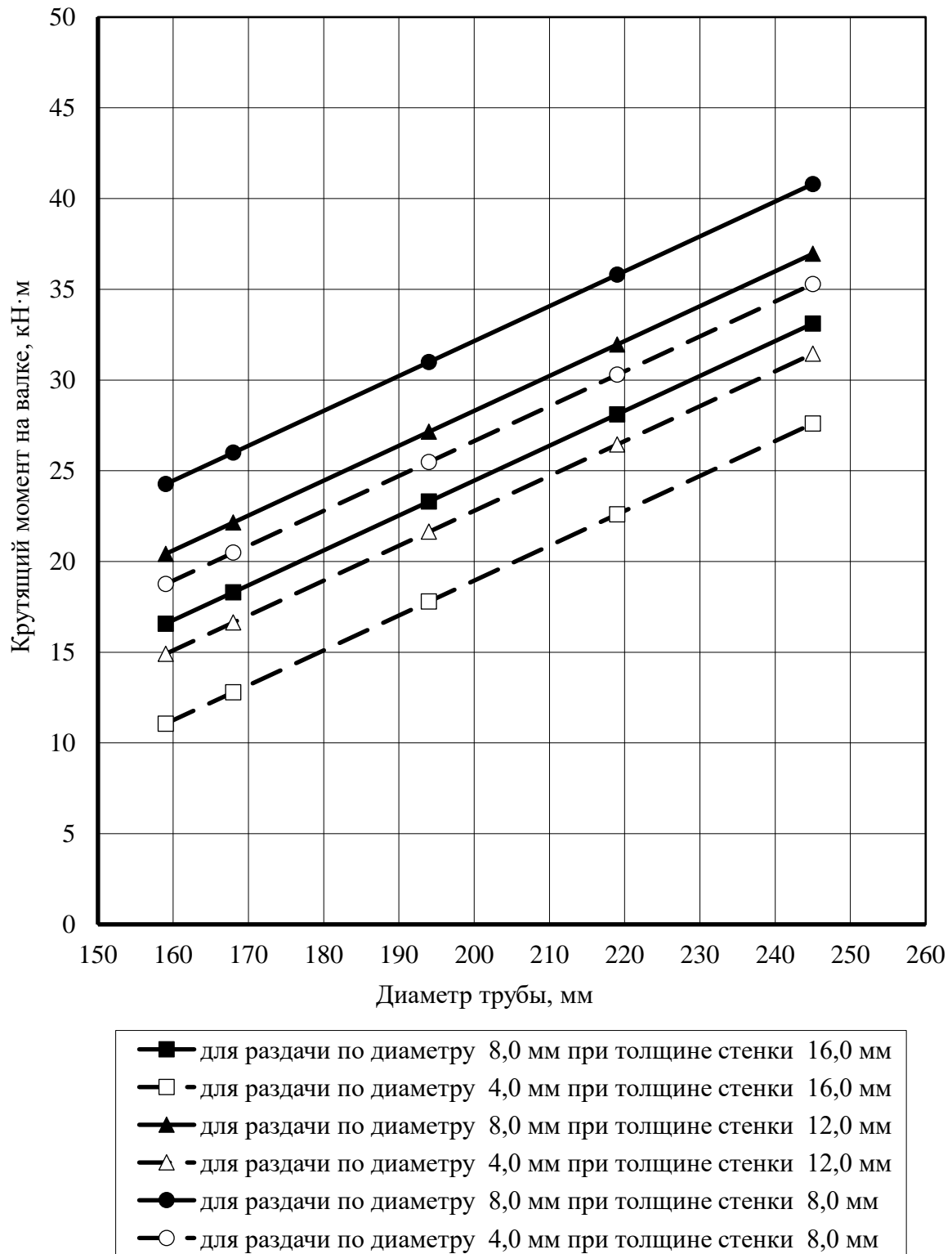


Рисунок 4.13 – Зависимости крутящего момента на валке обкатного стана при деформации концевых участков в зависимости от входных параметров процесса риллингования труб по данным эксперимента при сопротивлении металла деформации 70 МПа

С помощью имеющихся замеров, а также предлагаемой методики обработки результатов, выполним проверку адекватности, разработанной в 3 главе математической модели процесса поперечно-винтовой прокатки труб в двухвалковой клетки. Для этого используемый алгоритм задания применим для моделирования перечисленных в таблице 4.1 маршрутов с учётом физико-механических свойств марок сталей, из которых трубы изготовлены, и термических режимов деформирования. В качестве исходной геометрии труб используются трубы круглого сечения, пропущенные через калибр автоматического стана с заданной согласно регламентирующей документации оправкой. Таким образом, трубы имеют не только размеры, адекватные геометрии черновой трубы, но и определенную разнотолщинность.

На рисунках 4.14–4.15 приведены типовые графики, полученные в результате моделирования маршрутов на примере готового размера трубы 219×8 ($D/S = 27$). На графиках легко наблюдается захват заготовки, период установившейся прокатки и итоговый пик. Колебания энергосиловых параметров при стационарной прокатке вызван разнотолщинностью заготовки.

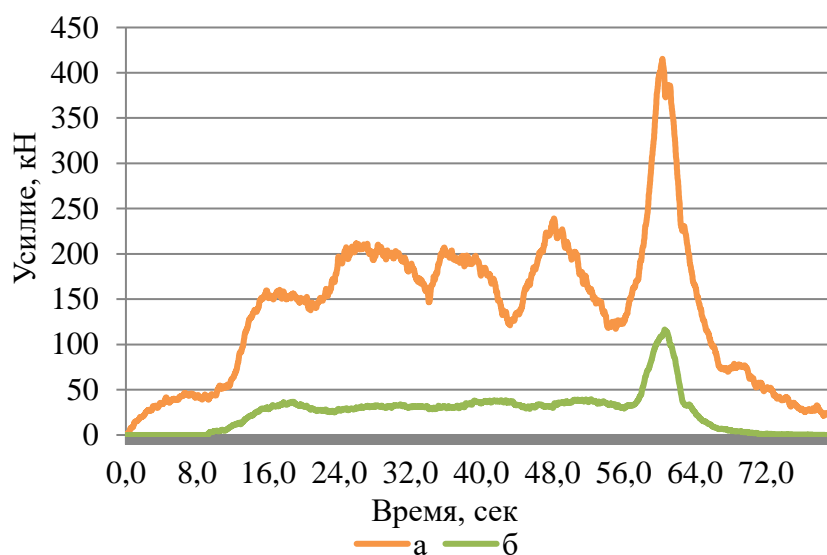


Рисунок 4.14 – График изменения усилия прокатки (а) и осевого усилия (б) при обкатке трубы 219×8

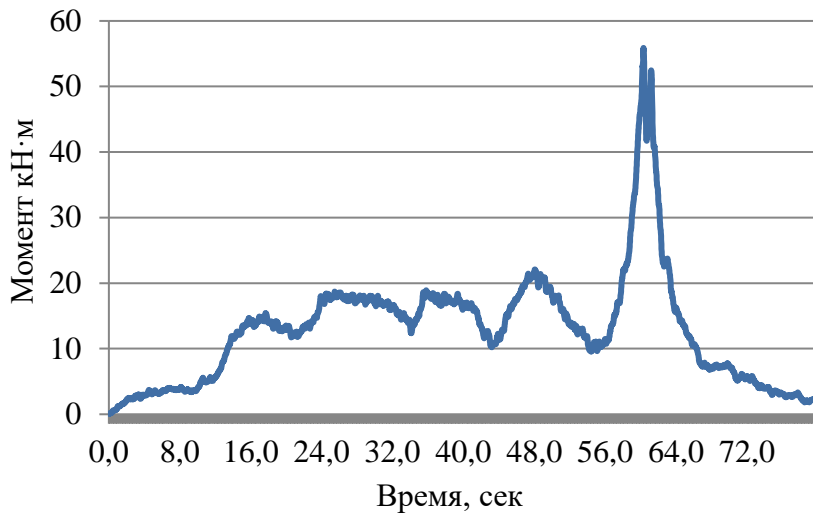


Рисунок 4.15 – График изменения момента на валках при обкатке трубы 219×8

На основании замеров энергосиловых параметров, а также геометрических характеристик заготовки до и после обкатки, подберем коэффициенты линейной зависимости по формуле (4.2):

$$M_A^t = \frac{\sigma_s}{1000} (208 - 0,21 \cdot D + 1,54 \cdot \Delta D + 4,5 \cdot S) \quad (4.7)$$

при коэффициентах корреляции $R = 0,99$ и $R^2 = 0,99$ и диапазоне отклонений от -10,68% до +6,06%.

Графики зависимостей для некоторых случаев, попадающих в диапазон моделирования, приведены на рисунке 4.16

Сравнение с аналогичными графиками, полученными на основании экспериментальных измерений, показывает достаточное совпадение между обеими группами результатов как по характеру изменения величин, так и по их значениям. Так максимальные показатели установившейся стадии прокатки получены при наибольшей толщине стенки и максимальной раздаче, что подтверждает гипотезу, выдвинутую при анализе экспериментальных зависимостей. При увеличении отношения D/S также наблюдается планомерное снижение показателей процесса от 18,1 кН·м до 16,8 кН·м (около 7%). Менее явно выражено влияние величины раздачи трубы: при сравнении зависимостей для толщины стенки (16 мм) и подъема (8 мм) и для толщины стенки (8 мм) и

подъема (4 мм) снижение значений момента оказывается в пределах 16% для диаметра 159 мм и в пределах 18% для диаметра 245 мм.

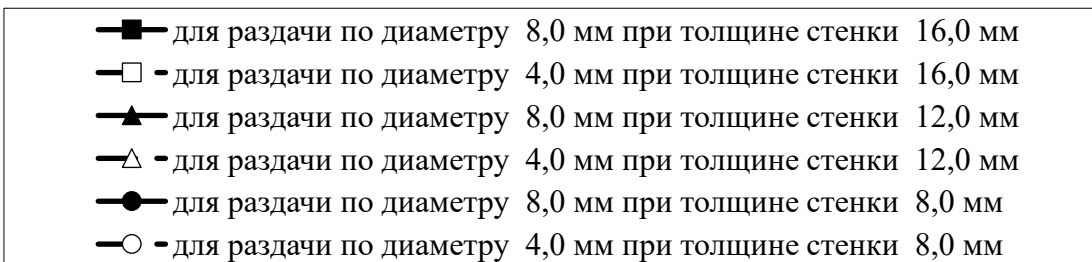
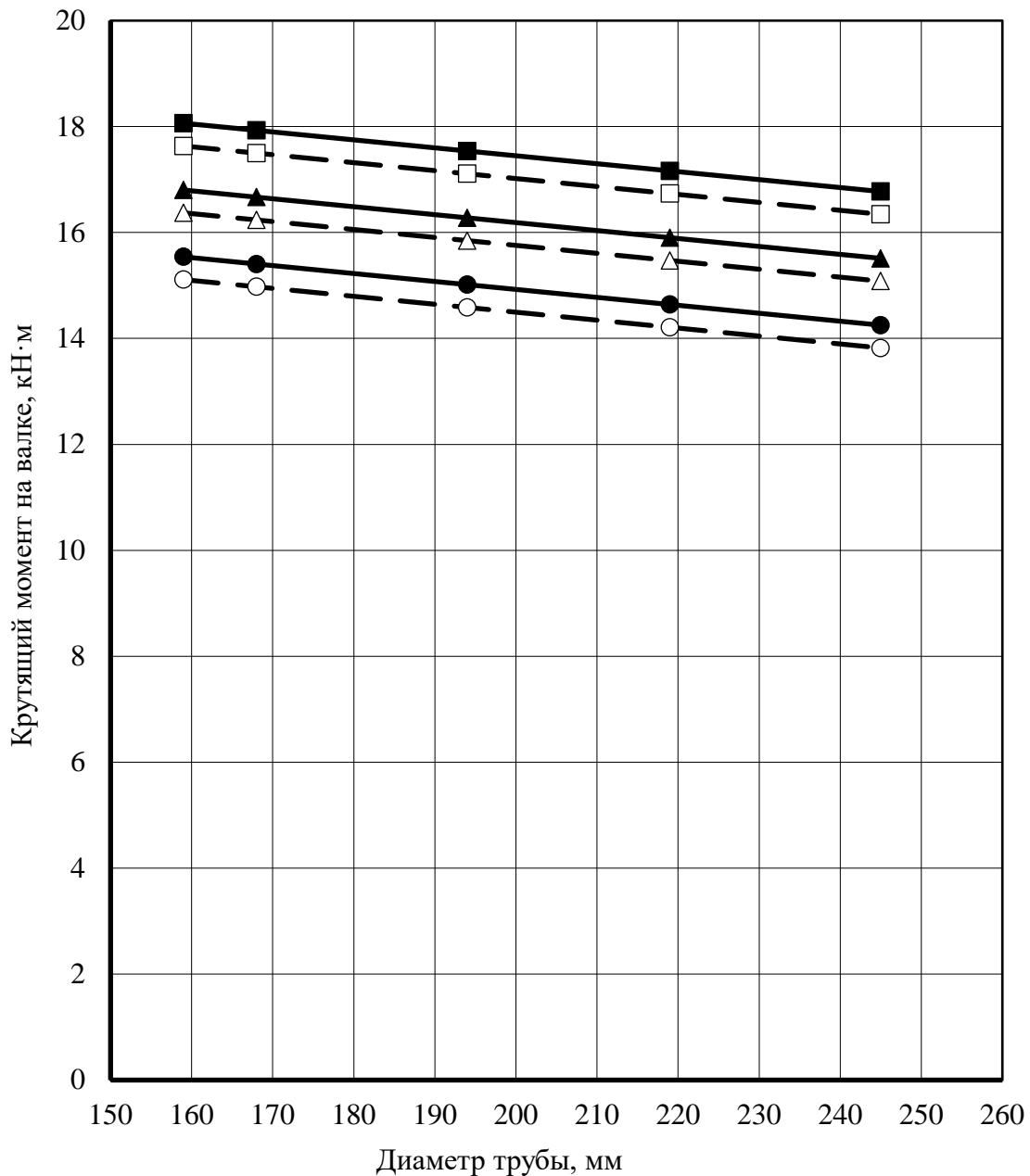


Рисунок 4.16 – Зависимости крутящего момента на валке обкатного стана для установившегося режима прокатки в зависимости от входных параметров процесса риллингования труб для МКЭ моделирования при сопротивлении металла деформации 70 МПа

Проведем обработку данных, полученных в точках замера пиковых нагрузок. Линейная зависимость имеет следующий вид:

$$M_{Amax}^t = \frac{\sigma_s}{1000} (4,14 \cdot D - 0,8 \cdot \Delta D - 5,7 \cdot S - 325) \quad (4.8)$$

при коэффициентах корреляции $R = 0,94$ и $R^2 = 0,89$ и диапазоне отклонений от -6,48% до +25,1%.

Графики изменения параметров приведены на рисунке 4.17.

По результатам построения можно сделать вывод о близости значений, полученных путем обработки теоретического решения задачи, с аналогичными, построенными на основе эксперимента. Решение не устанавливает зависимость между величиной увеличения диаметра после обкатки и значением момента прокатки (менее 1%), которое может объясняться независимостью геометрии очага деформации при прокатке утолщений, образованных путем гибки «плавников» и прижатия их к поверхности трубы, от изменения взаимного расположения валков и оправки. В остальном можно утверждать следующее: с увеличением диаметра происходит рост величины момента от 19,9 до 44,8 кН·м (приблизительно в 2,2 раз) для минимальной толщины стенки 8 мм. Рассмотрение обкатки трубы с повышенной толщиной стенки (рост в 2,5 раза) демонстрирует снижение величин на 16% для труб диаметром 159 мм и 7% для труб диаметров 245 мм.

В таблице 4.3 представлено сравнение величин, полученных в результате обработки теоретических и экспериментальных данных. С учетом имеющихся данным можно говорить о достаточной сходимости между математической моделью и реальными нагрузками при производстве горячедеформированных труб в линии ТПА-220.

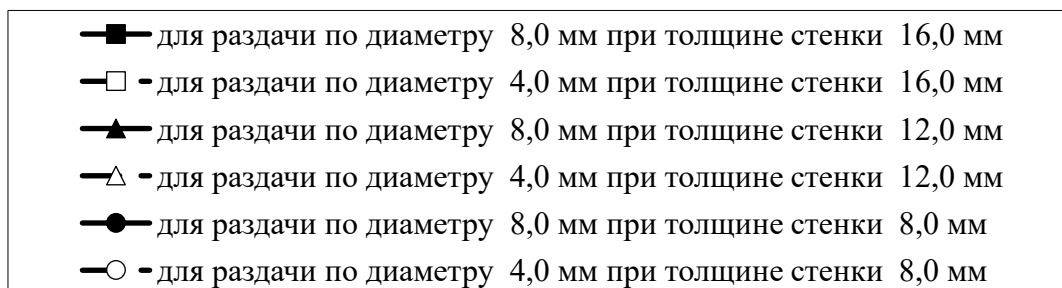
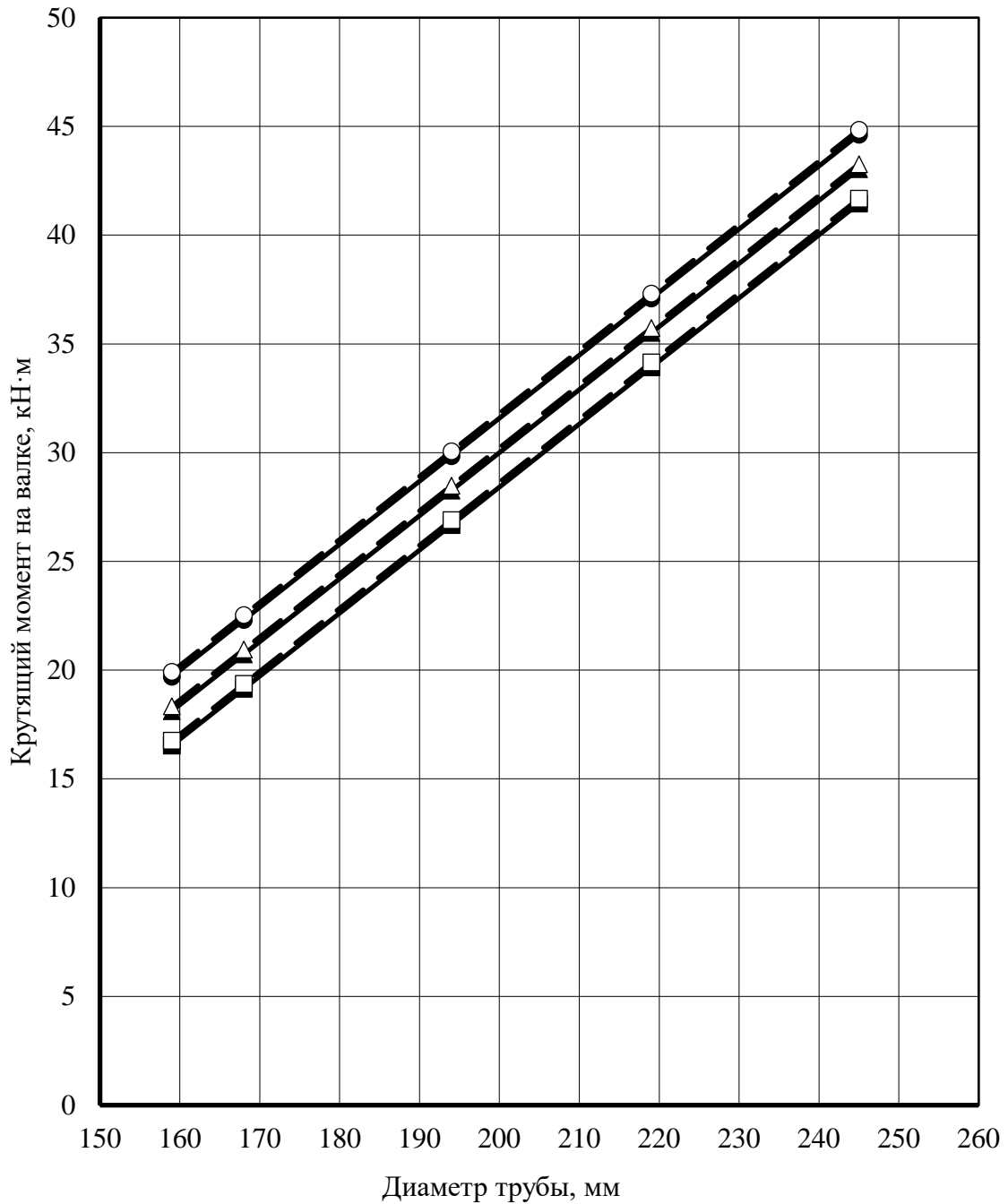


Рисунок 4.17 – Зависимости крутящего момента на валке обкатного стана при деформации концевых участков в зависимости от входных параметров процесса риллингования труб для МКЭ моделирования при сопротивлении металла деформации 70 МПа

Таблица 4.3 – Сравнение величин, полученных в результате обработки теоретических и экспериментальных данных

D , мм	S , мм	D/S	ΔD , мм	M_A^e , кН·м	M_A^t , кН·м	M_A^e / M_A^t	M_{Amax}^e , кН·м	M_{Amax}^t , кН·м	M_{Amax}^e / M_{Amax}^t
159	8	20	8	12,9	15,1	0,85	18,8	19,9	0,94
159	12	13	8	13,9	16,4	0,85	14,9	18,3	0,81
159	16	10	8	15,0	17,6	0,85	11,1	16,8	0,66
159	8	20	4	11,3	15,5	0,72	24,3	19,7	1,23
159	12	13	4	12,3	16,8	0,73	20,4	18,1	1,13
159	16	10	4	13,3	18,1	0,74	16,6	16,5	1,00
168	8	21	8	12,7	15,0	0,85	20,5	22,5	0,91
168	12	14	8	13,8	16,2	0,85	16,6	20,9	0,79
168	16	11	8	14,8	17,5	0,85	12,8	19,4	0,66
168	8	21	4	11,1	15,4	0,72	26,0	22,3	1,17
168	12	14	4	12,1	16,7	0,73	22,1	20,7	1,07
168	16	11	4	13,1	17,9	0,73	18,3	19,1	0,96
194	8	24	8	12,2	14,6	0,84	25,5	30,1	0,85
194	12	16	8	13,2	15,8	0,83	21,6	28,5	0,76
194	16	12	8	14,2	17,1	0,83	17,8	26,9	0,66
194	8	24	4	10,5	15,0	0,70	31,0	29,8	1,04
194	12	16	4	11,6	16,3	0,71	27,1	28,3	0,96
194	16	12	4	12,6	17,5	0,72	23,3	26,7	0,87
219	8	27	8	11,7	14,2	0,82	30,3	37,3	0,81
219	12	18	8	12,7	15,5	0,82	26,4	35,7	0,74
219	16	14	8	13,7	16,7	0,82	22,6	34,1	0,66
219	8	27	4	10,0	14,6	0,68	35,8	37,1	0,97
219	12	18	4	11,0	15,9	0,69	32,0	35,5	0,90
219	16	14	4	12,1	17,2	0,70	28,1	33,9	0,83
245	8	31	8	9,5	13,8	0,69	35,3	44,8	0,79
245	12	20	8	10,5	15,1	0,70	31,4	43,3	0,73
245	16	15	8	11,5	16,3	0,71	27,6	41,7	0,66
245	8	31	4	11,1	14,3	0,78	40,8	44,6	0,91
245	12	20	4	12,2	15,5	0,78	37,0	43,0	0,86
245	16	15	4	13,2	16,8	0,79	33,1	41,5	0,80

Интерес также представляет построение графиков зависимостей для различных случаев тонкостенности трубы с учётом показателя вытяжки (раздачи) трубы при обкатке. Графики скомпонованы таким образом, чтобы последовательно представить экспериментальные и теоретические данные и представлены на рисунках 4.18–4.21.

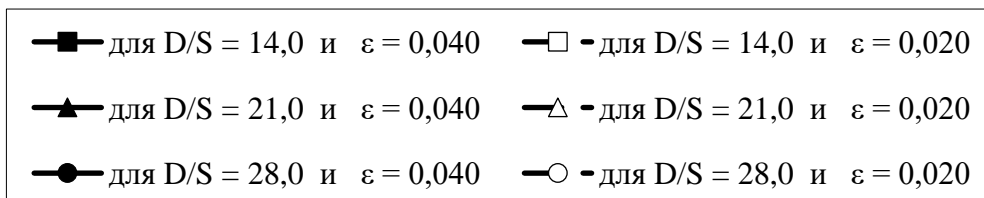
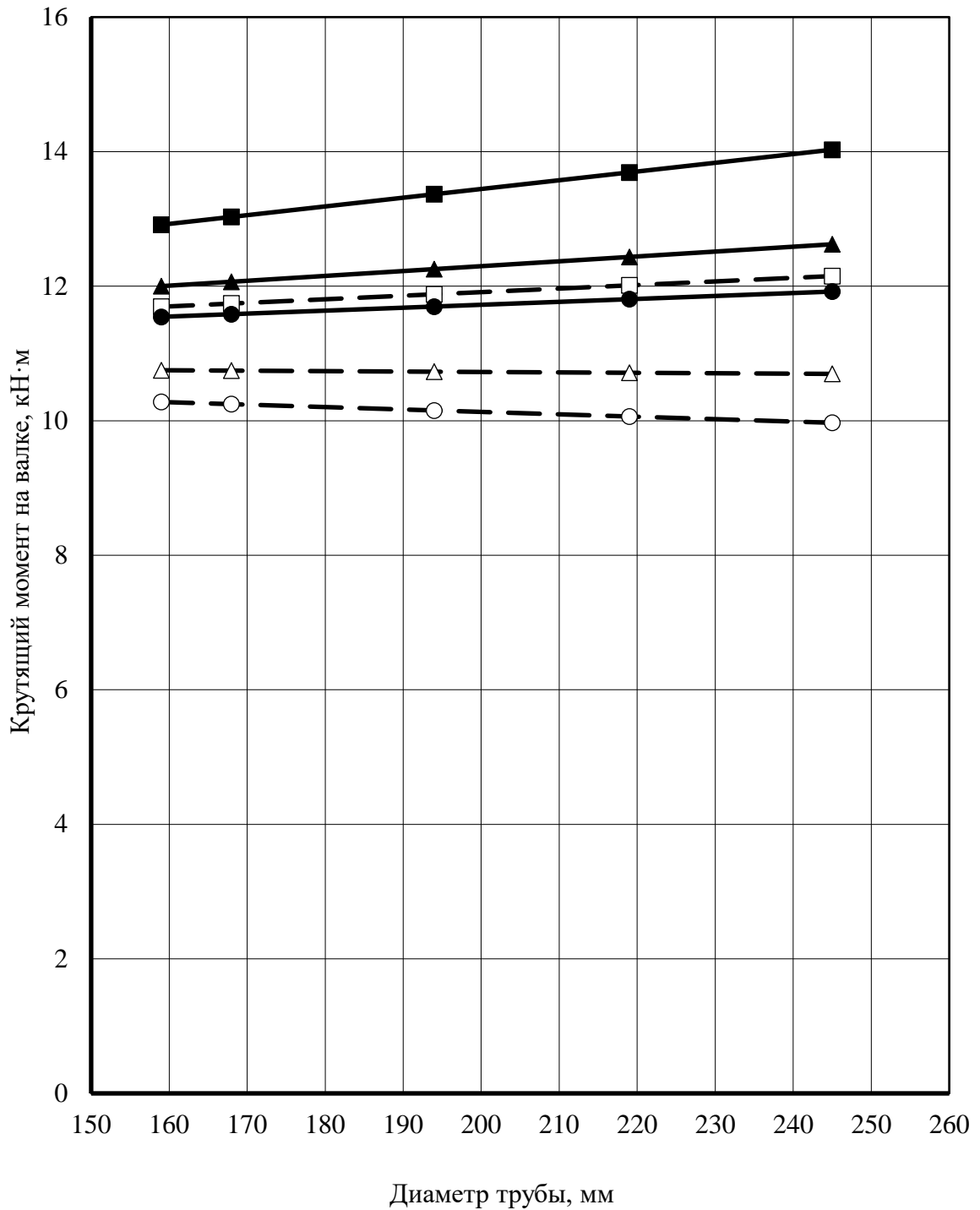


Рисунок 4.18 – Зависимости крутящего момента на валке обкатного стана для установившегося режима прокатки в зависимости от степени деформации и относительной тонкостенности трубы по данным эксперимента при сопротивлении металла деформации 70 МПа

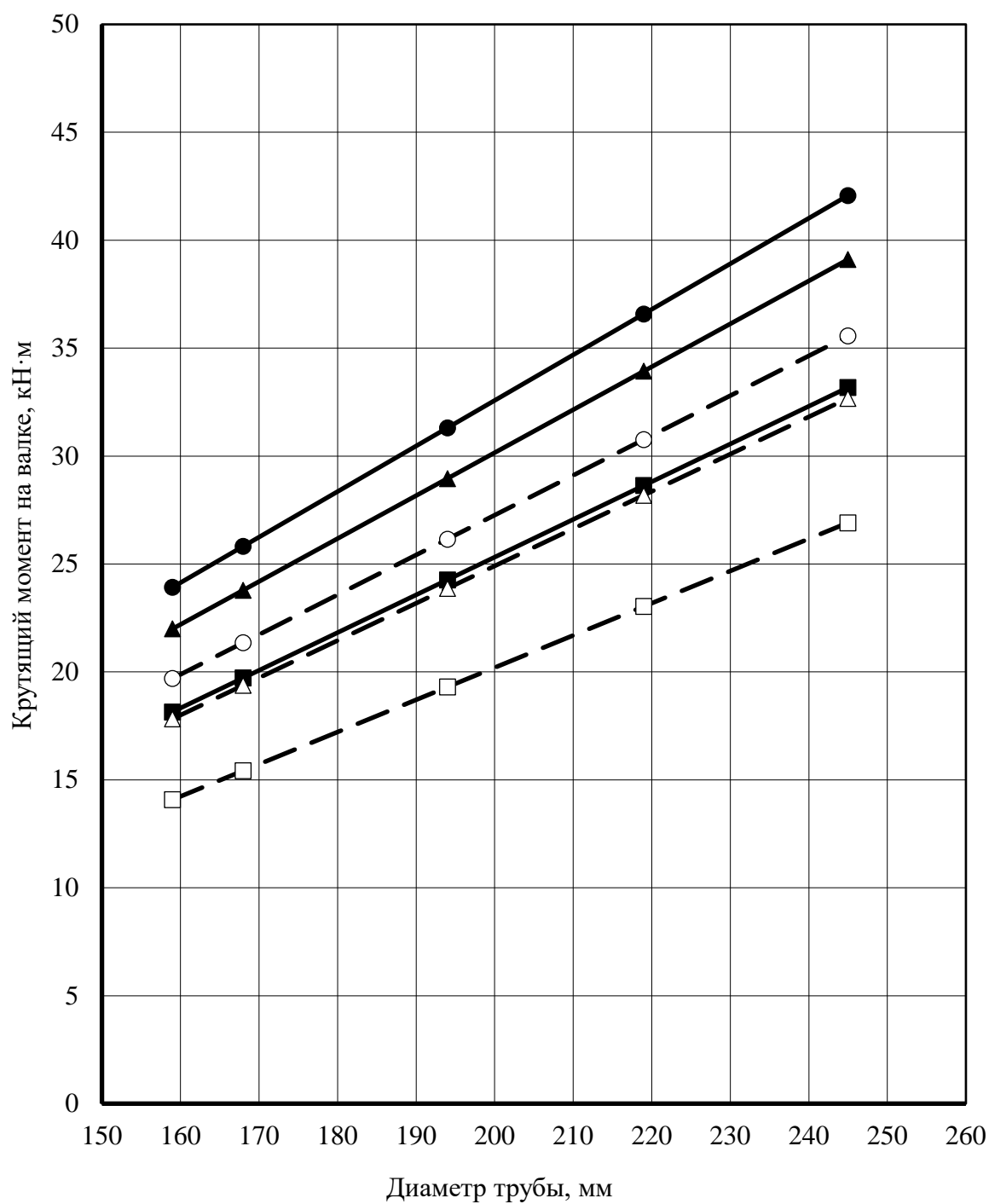


Рисунок 4.19 – Зависимости крутящего момента на валке обкатного стана при деформации концевых участков в зависимости от входных параметров процесса риллингования труб по данным эксперимента при сопротивлении металла деформации 70 МПа

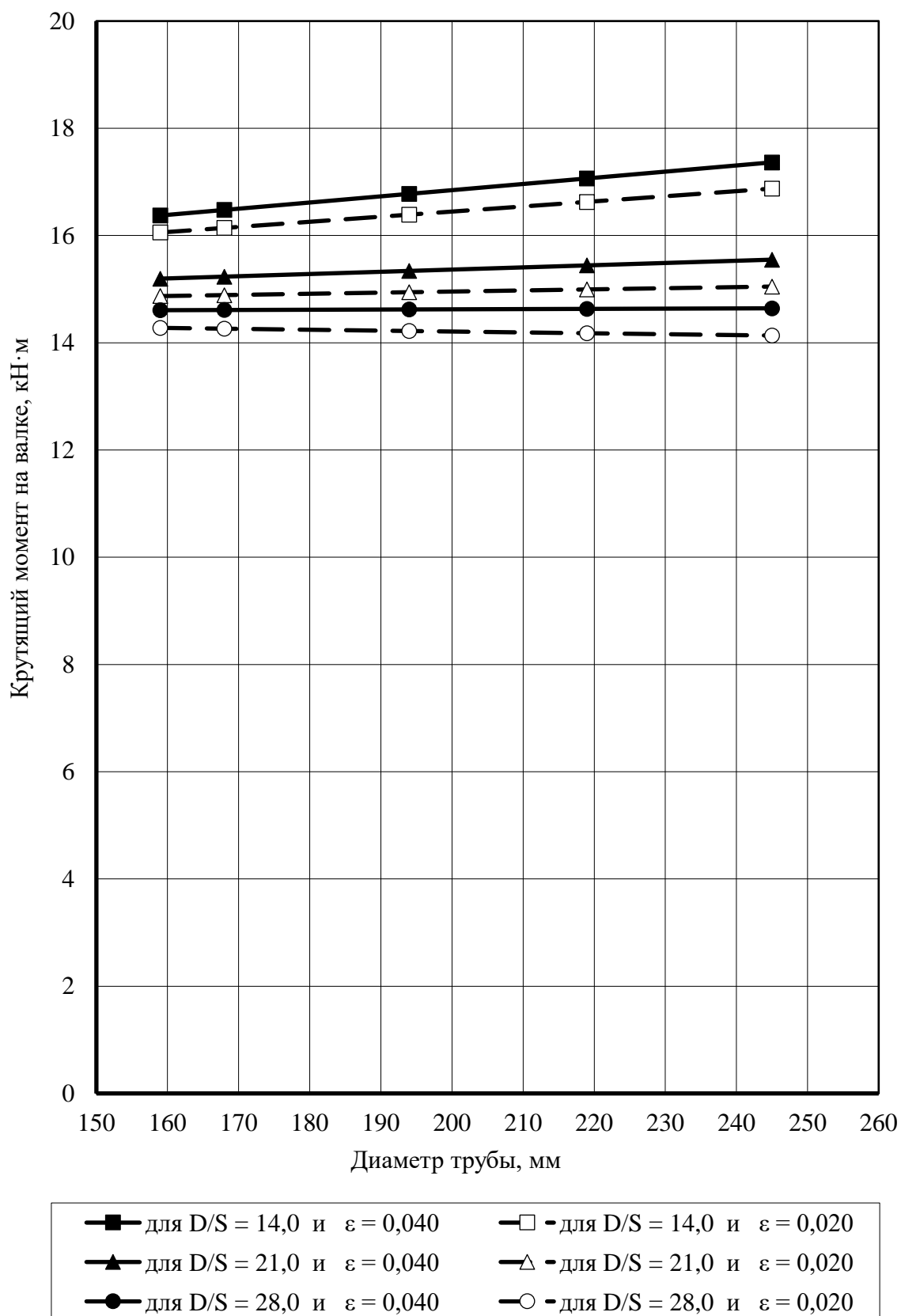


Рисунок 4.20 – Зависимости крутящего момента на валке обкатного стана для установившегося режима прокатки в зависимости от степени деформации и относительной тонкостенности трубы для МКЭ моделирования при сопротивлении металла деформации 70 МПа

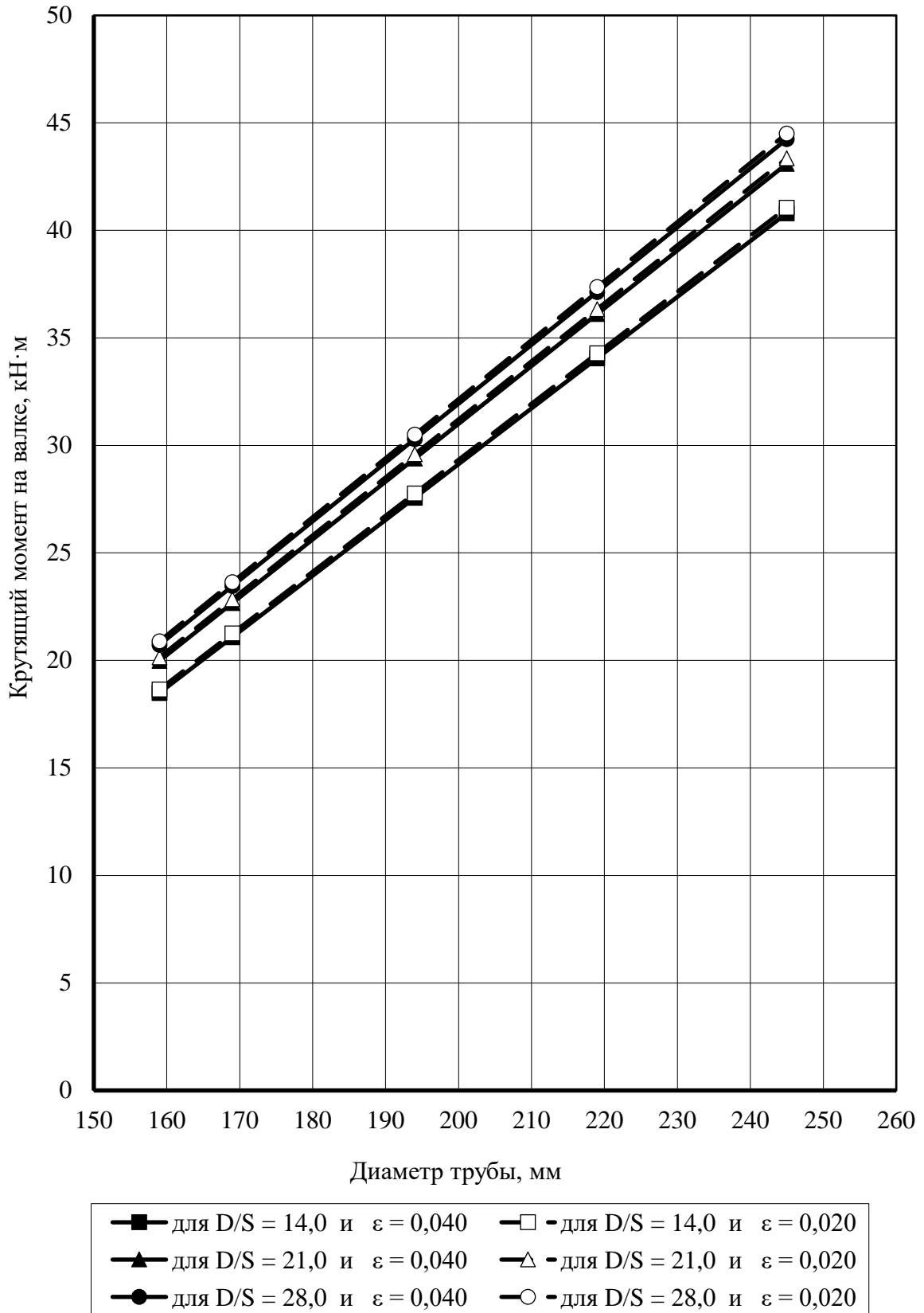


Рисунок 4.21 – Зависимости крутящего момента обкатного стана при деформации концевых участков в зависимости от степени деформации и относительной тонкостенности трубы для МКЭ моделирования при сопротивлении металла деформации 70 МПа

Графики показывают, что практически во всех случаях сохраняется постоянство значений по моментам прокатки независимо от прокатываемого сортамента. Максимальный рост величины момента наблюдается для наиболее толстостенной трубы ($D/S = 14$) при повышенной степени деформации ($\varepsilon = 0,040$) и составляет 9% (по экспериментальным данным) и 6% (по результатам КЭ моделирования). Для тонкостенных труб ($D/S = 28$) при сниженных значениях степени деформации ($\varepsilon = 0,020$) имеет место падения значений на 3% по результатам эксперимента и 1% по результатам МКЭ моделирования. Разница между значения момента для повышенных значений степени деформации составляет при диаметре трубы 159 мм 11% (эксперимент) и 11% (моделирование); для диаметра трубы 245 мм 15% (эксперимент) и 16% (моделирование). Для меньшей степени деформации разница между значения будет составлять при диаметре трубы 159 мм 12% (эксперимент) и 11% (моделирование) и для диаметра трубы 245 мм 18% (эксперимент) и 16% (моделирование).

В случае обкатки концевых участков труб (с наличием концевых дефектов) для всех графиков имеет место рост параметров, связанный прежде всего с поперечной устойчивостью сечения трубы при выходе из рабочей клетки обкатного стана, а также размером обкатываемого дефекта. Оба фактора преобладают в случае прокатки наиболее тонкостенной трубы. При этом больший диаметр сказывается на увеличении дефекта, а, следовательно, выражается в росте значений момента прокатки. В случае теоретических данных изменение степени деформации не приводит к значительным изменениям величин, в то время как при эксперименте изменение степени деформации влияет на полученные значения.

В обоих случаях наибольший рост наблюдается для отношения $D/S = 28$ при максимальной степени деформации: для теоретического решения на 113% и для экспериментальных и исследований на 76%. Данные значения на 13% (моделирование) и 31% (эксперимент) превышают аналогичные, полученные для

$D/S = 14$ (при $\varepsilon = 0,040$), для наружного диаметра трубы 159 мм и на 8% (моделирование) и 27% (эксперимент) для наружного диаметра 245 мм. По экспериментальным измерениям повышение степени деформации от 0,04 до 0,08 вызывает рост момента прокатки при $D/S = 14$ на 29% для трубы диаметром 159 мм и на 23% для диаметра 245 мм. Для случая более тонкостенной трубы $D/S = 28$ увеличение степени деформации от 0,04 до 0,08 приводит к росту момента прокатки на 23% для диаметра труб 159 мм и на 18% при наружном диаметре труб 245 мм.

Так как теоретическое решение позволяет оценить значения не только моментов на прокатных валках, но и усилия на валках и оправки обкатного стана, в продолжении исследования данной работы для указанных выше типоразмеров труб выполним анализ и обработку зависимостей для усилия прокатки и осевого усилия. Для удобства отображения сведем все имеющиеся значения коэффициентов линейных зависимостей в таблице 4.4.

Построим графики зависимостей усилий на валке, аналогичные построенным для моментов прокатки. Графики представлены на рисунках 4.22-4.25.

Нетрудно заметить, что характер зависимостей близок к аналогичным, полученным для моментов прокатки (как для теоретического решения задачи, так и для экспериментальных измерений). Например, для всех труб рассматриваемого диапазона с увеличением диаметра имеет место снижение усилия прокатки (в связи со снижением жёсткости сечения при повышении параметра D/S). Зависимости усилия на валке обкатного стана для установившегося режима прокатки представлены на рисунках 4.23 и 4.25. Максимальные величины получены для толщины стенки 16 мм: от 159,6 кН для диаметра 159 мм и до 134,7 кН для диаметра 245 мм (падение на 16%) при подъёме диаметра 8 мм; и от 115,3 кН для диаметра 159 мм и до 90,4 кН для диаметра 245 мм (падение на 22%) при подъёме диаметра 4 мм.

Таблица 4.4 – Значения коэффициентов линейных зависимостей

Источник данных	Название параметра	Режим обкатки	Постоянные				Коэффициенты корреляции		Предельные отклонения, %	
			α	β	γ	χ	R	R^2	Нижнее	Верхнее
Эксперимент	Момент прокатки	Установившийся	-0,30	5,90	3,68	155	0,656	0,810	-10	12
		Конец трубы	2,75	19,7	-13,7	-138				
Теория	Момент прокатки	Установившийся	-0,21	1,54	4,505	207,7	0,994	0,997	-10	6
		Конец трубы	4,14	-0,79	-5,66	-325				
	Усилие на валках	Установившийся	-2,76	318,3	-34,8	975,6	0,987	0,994	-12,9	17,24
		Конец трубы	33,73	160,98	-93,8	-3488,6				
Осевое усилие	Осевое усилие	Установившийся	2,9	37,9	-22,6	59,0	0,971	0,986	-18,33	12,22
		Конец трубы	9,475	33,78	-115,7	657,2				

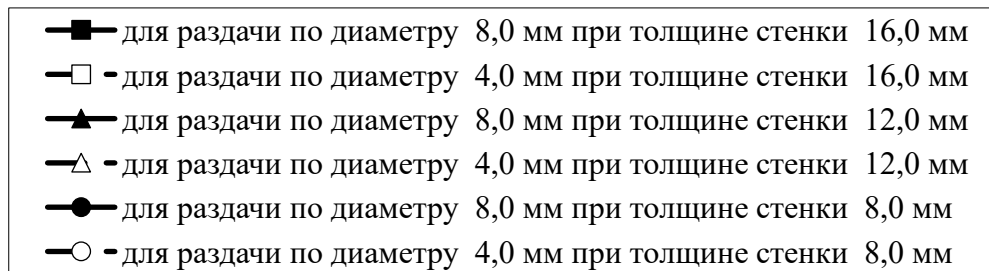
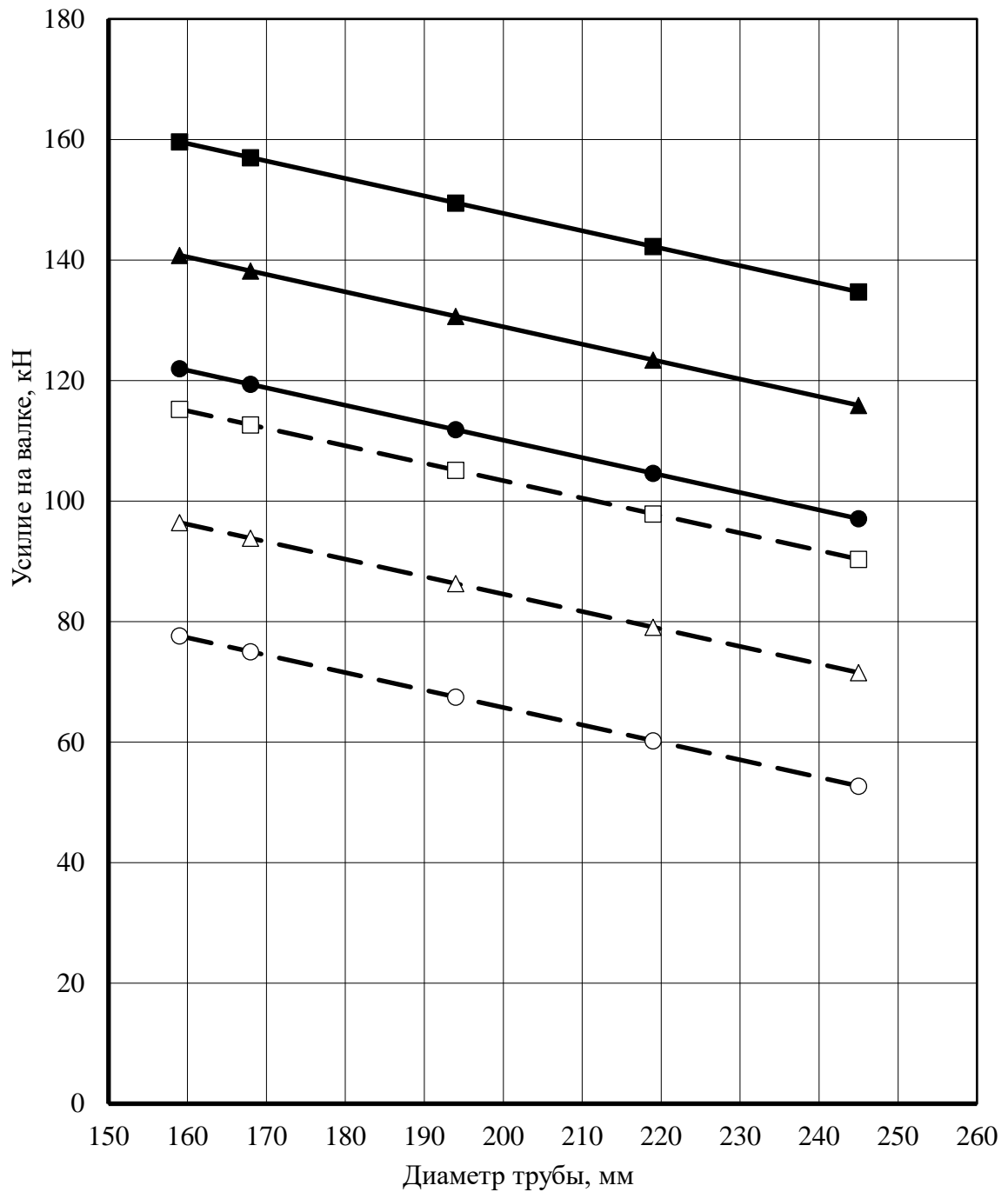


Рисунок 4.22 – Зависимости усилия на валке обкатного стана для установившегося режима прокатки в зависимости от входных параметров процесса риллингования труб для МКЭ моделирования при сопротивлении металла деформации 70 МПа

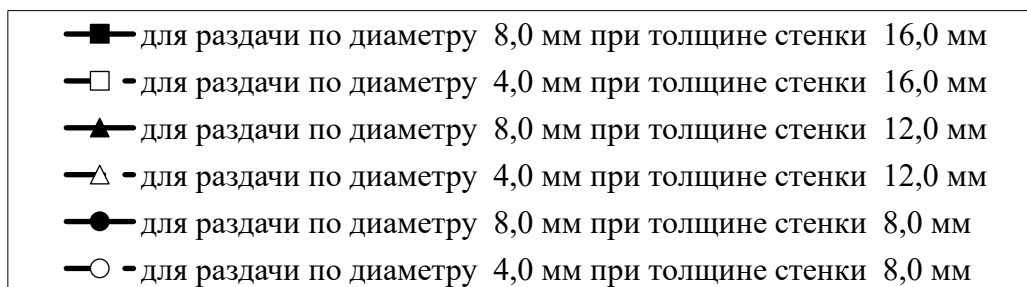
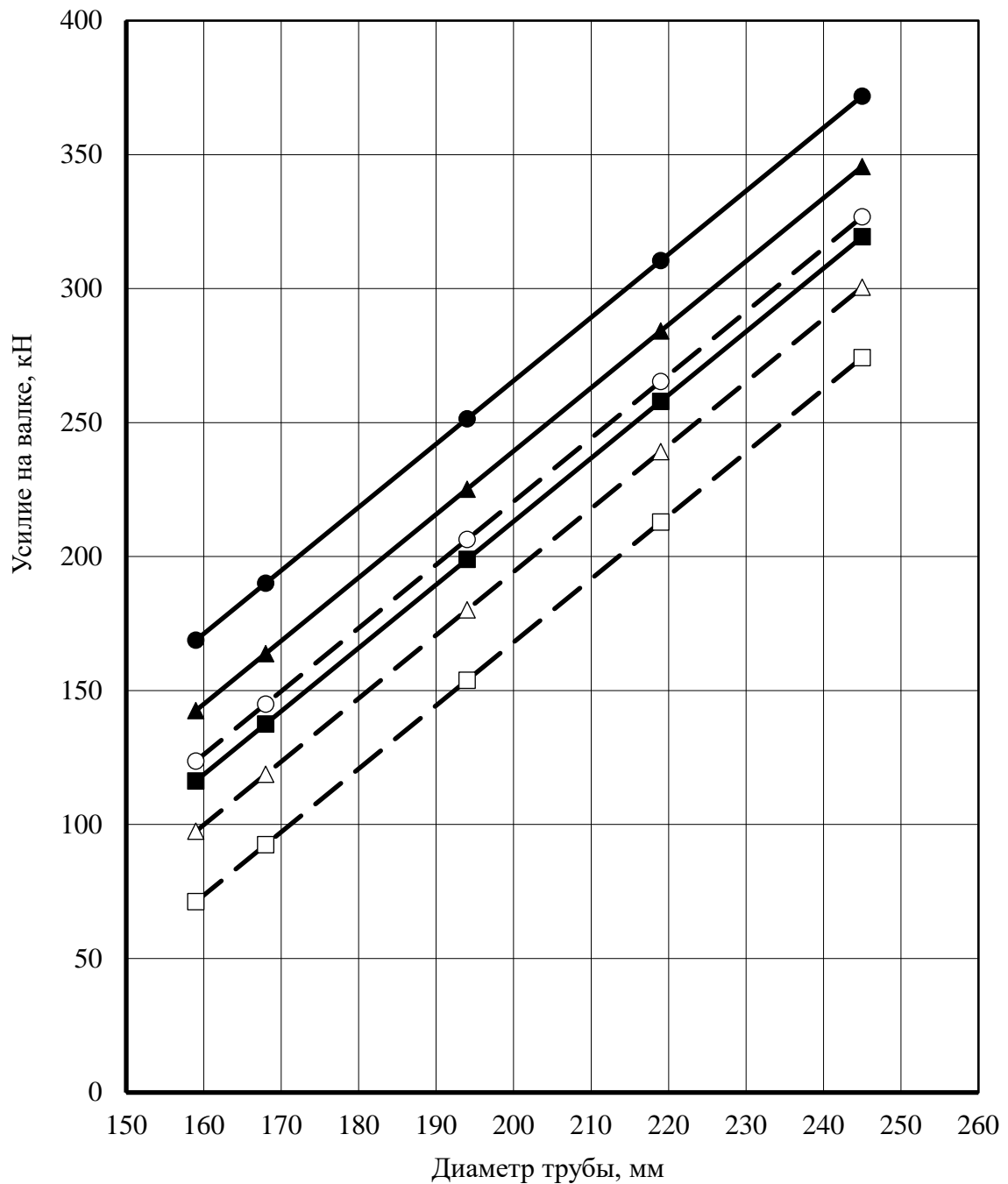


Рисунок 4.23 – Зависимости усилия на валке обкатного стана при деформации концевых участков в зависимости от входных параметров процесса риллингования труб для МКЭ моделирования при сопротивлении металла деформации 70 МПа

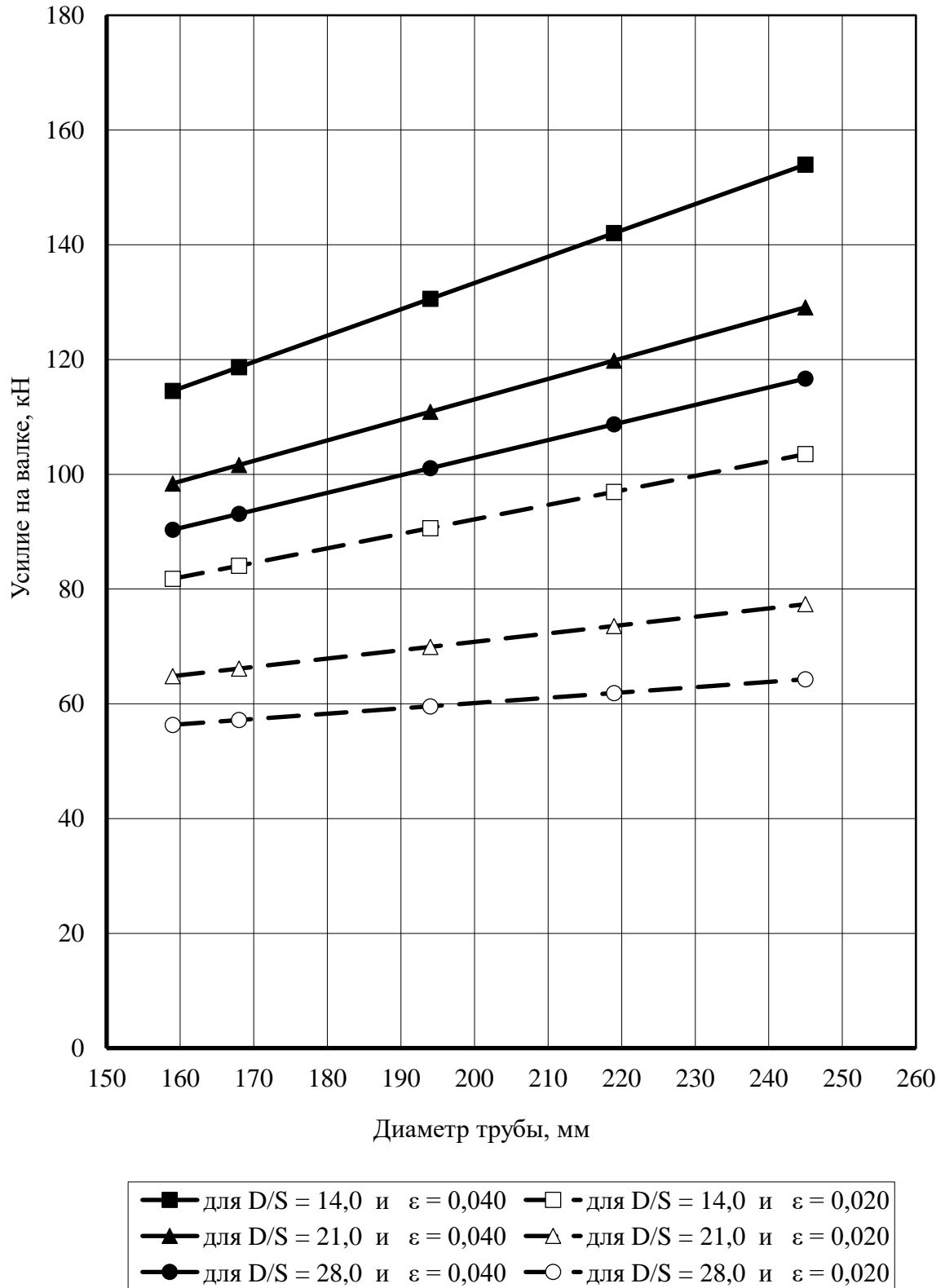


Рисунок 4.24 – Зависимости усилия на валке обкатного стана для установившегося режима прокатки в зависимости от степени деформации и относительной тонкостенности трубы для МКЭ моделирования при сопротивлении металла деформации 70 МПа

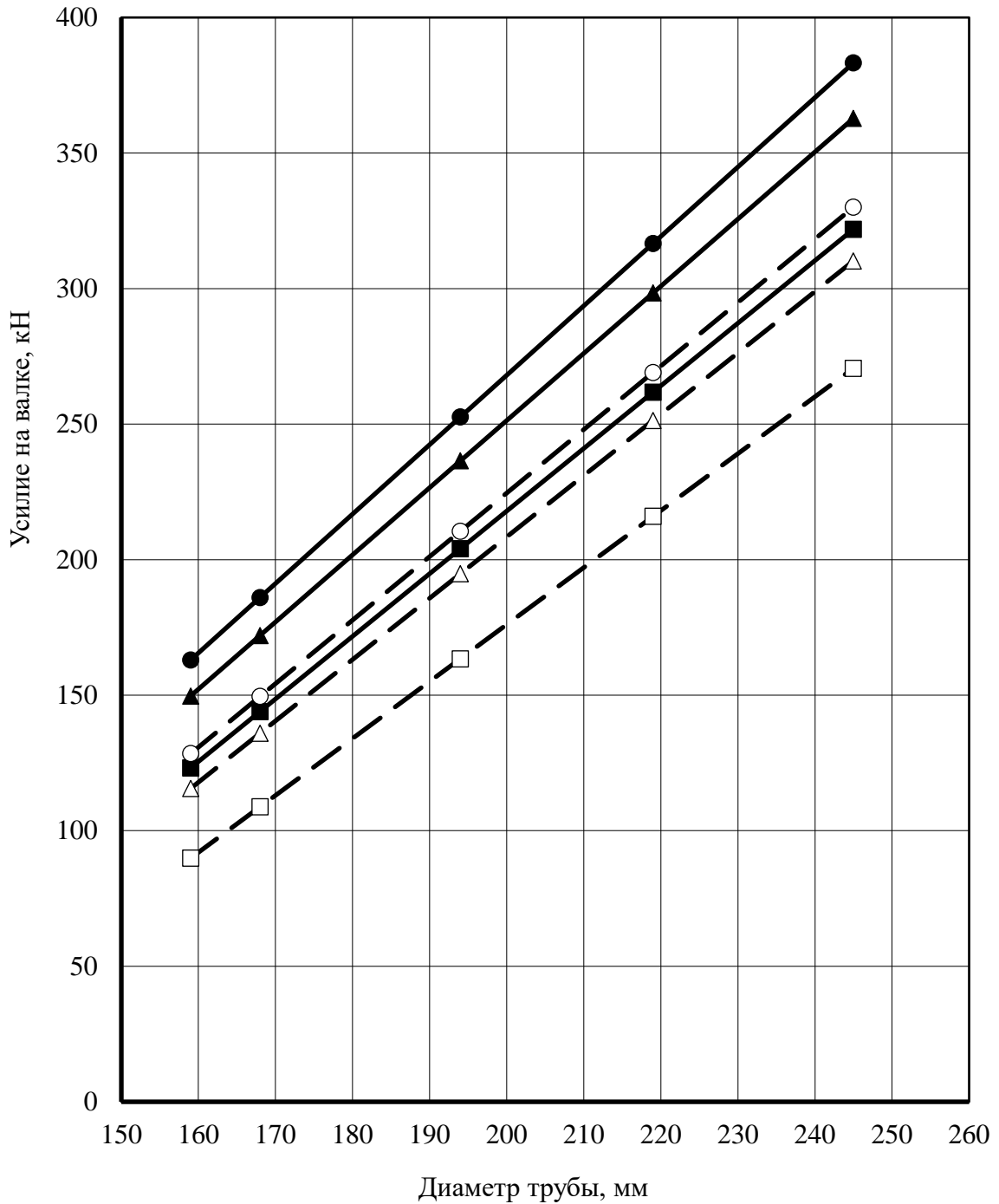


Рисунок 4.25 – Зависимости усилия на валке обкатного стана при деформации концевых участков в зависимости от входных параметров процесса риллингования труб для МКЭ моделирования при сопротивлении металла деформации 70 МПа

Различие между аналогичными случаями при повышении раздачи с 4 мм до 8 мм составляет для 159 мм 38% и для 245 мм 49%.

Отметим также, что при сохранении параметра D/S и относительно малых степенях деформации ($\varepsilon = 0,02$) для относительно тонкостенных труб ($D/S = 28$) величина усилия незначительно увеличивается (на 14%). Для более толстостенных труб характерно возрастание усилия (на 27%) при $D/S = 14$ и $\varepsilon = 0,02$, которое усиливается с повышением раздачи диаметра (рис. 19). При обкатке наиболее толстостенных труб ($D/S = 14$) при $\varepsilon = 0,04$ имеет место возрастание усилия на валках от 114,5 кН для диаметра 159 мм и до 154 кН для диаметра 245 мм (около 34%), что превышает аналогичные значения для диаметра трубы 159 мм на 40% и для диаметра 245 мм на 49% при пониженных степенях деформации ($\varepsilon = 0,02$).

При завершении процесса обкатки (и попадании в калибр концевых дефектов) усилие на валках демонстрирует резкое возрастание, что отражено на графиках, представленных на рисунках 4.23 и 4.25. Наибольшие значения достигаются для более тонкостенных труб при толщине стенки 8 мм и ранжируются от 168,8 кН при диаметре 159 мм и до 371,9 кН при диаметре 245 мм (рост в 2,2 раза) при раздаче диаметра 8 мм. Снижение раздачи до 4 мм приводит к уменьшению усилий на 27% на нижней границе указанного сортамента и на 12% в верхней.

Данная картина характерна для всего рассматриваемого диапазона при обкатке труб с постоянным отношением D/S и при различных режимах обжатия в клетки (рис.). Как видно из графиков, наибольшие значения имеют место для больших диаметров и более тонкостенных труб. Степень деформации увеличивает количество дефектного металла «плавника», находящегося одновременно в очаге деформации, что тоже приводит к достаточно резкому возрастанию усилия. Наименьшие значения получены для отношений $D/S = 14$ и $\varepsilon = 0,02$ и равны для диаметра 159 мм 89,9 кН, для 245 мм – 270,6 кН

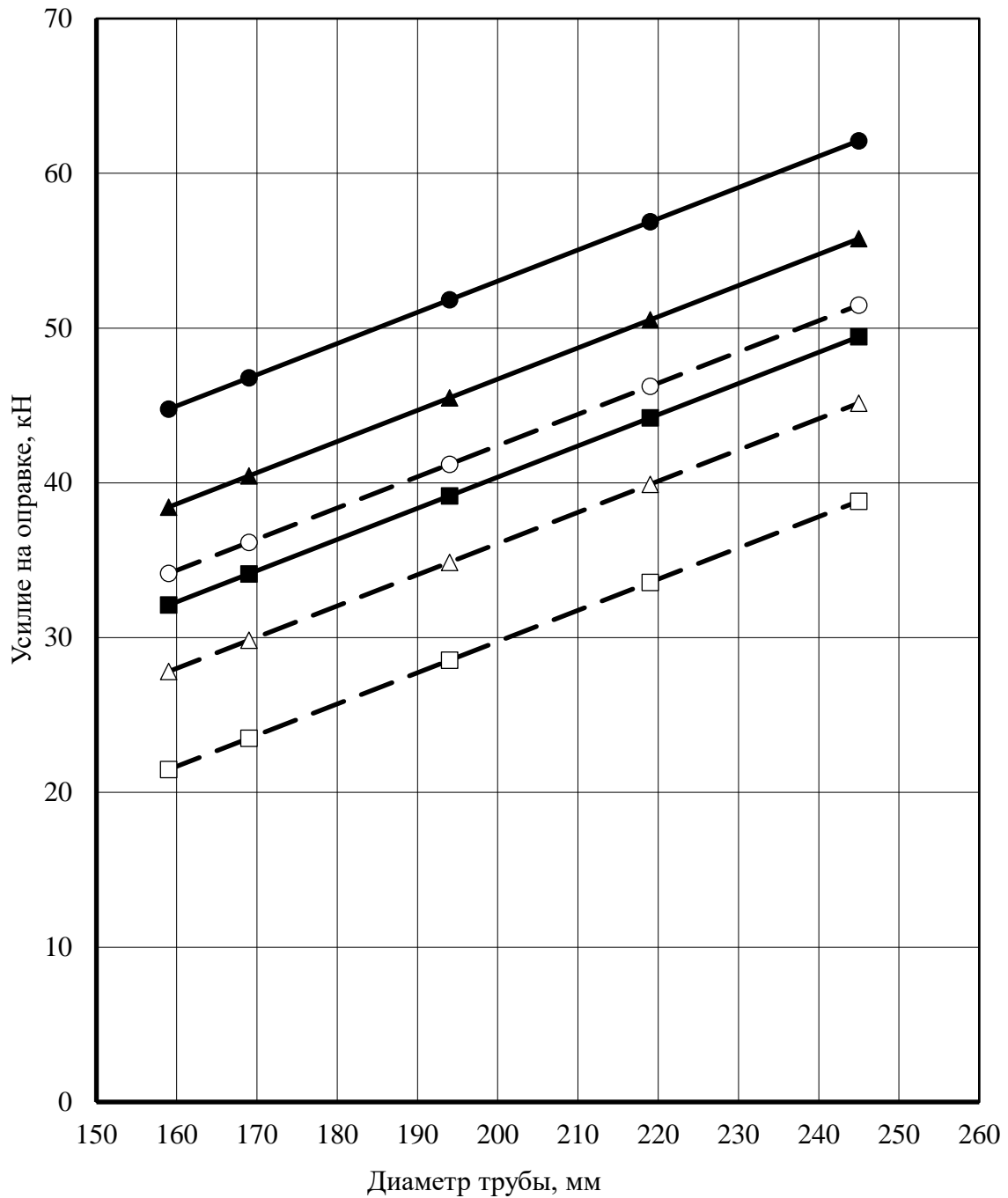
(увеличение в 3 раза). При рассмотрении аналогичного диапазона для $D/S = 28$ и $\varepsilon = 0,04$ имеем превышение значений на 81% (73,1 кН) по нижнему уровню диапазона и на 42% (112,7 кН) по верхнему уровню значений диаметра.

В тоже время осевое усилие демонстрирует другой характер поведения. и имеет тенденцию к повышению значений при возрастании диаметра. Графики изменения осевого усилия представлены на рисунках 4.26-4.29. Например, при раздаче диаметра 4 мм и толщине стенки 16 мм возрастание осевого усилия от диаметра 159 мм до диаметра 245 мм 80%.

Это может объясняться расширением площади контакта между оправкой и заготовкой. Трубы с менее жестким профилем (за счет более тонкой стенкой) имеют более развитую площадь посадки, а более толстостенные ограничены по контактной площади. Например, при том же самой величине раздачи наружного диаметра утонение стенки до 8 мм приводит к росту осевых усилий на 59% при диаметре 159 мм и на 33% при диаметре 245 мм.

Отметим, что увеличение раздачи диаметра при обкатке также ведёт к повышению осевого усилия, в частности, при изменении «подъёма» диаметра от 4 мм до 8 мм для труб толщиной стенки 8 мм рост осевых усилий составляет 21% для диаметра 245 мм, а для труб толщиной стенки 16 мм – 60% для того же диаметра.

При раскатке концевых участков наблюдается всплеск осевых усилий, наиболее явно выраженные для более тонкостенных труб. Зависимости усилия на оправке обкатного стана при деформации концевых участков представлена на рисунке 4.28. Это объясняется, в том числе, потерей устойчивости поперечного сечения трубы при гибке и обкатке «плавника», образовавшегося на заднем конце трубы, и, вследствие этого, затруднении при перемещении заготовки вдоль оправки. Рост усилий при толщине стенки 8 мм и раздаче диаметра 8 мм возрастает в указанном диапазоне диаметров на 54%.



- — для раздачи по диаметру 8,0 мм при толщине стенки 16,0 мм
- — для раздачи по диаметру 4,0 мм при толщине стенки 16,0 мм
- ▲ — для раздачи по диаметру 8,0 мм при толщине стенки 12,0 мм
- △ — для раздачи по диаметру 4,0 мм при толщине стенки 12,0 мм
- — для раздачи по диаметру 8,0 мм при толщине стенки 8,0 мм
- — для раздачи по диаметру 4,0 мм при толщине стенки 8,0 мм

Рисунок 4.26 – Зависимости усилия на оправке обкатного стана для установившегося режима прокатки в зависимости от входных параметров процесса риллингования труб для МКЭ моделирования при сопротивлении металла деформации 70 МПа

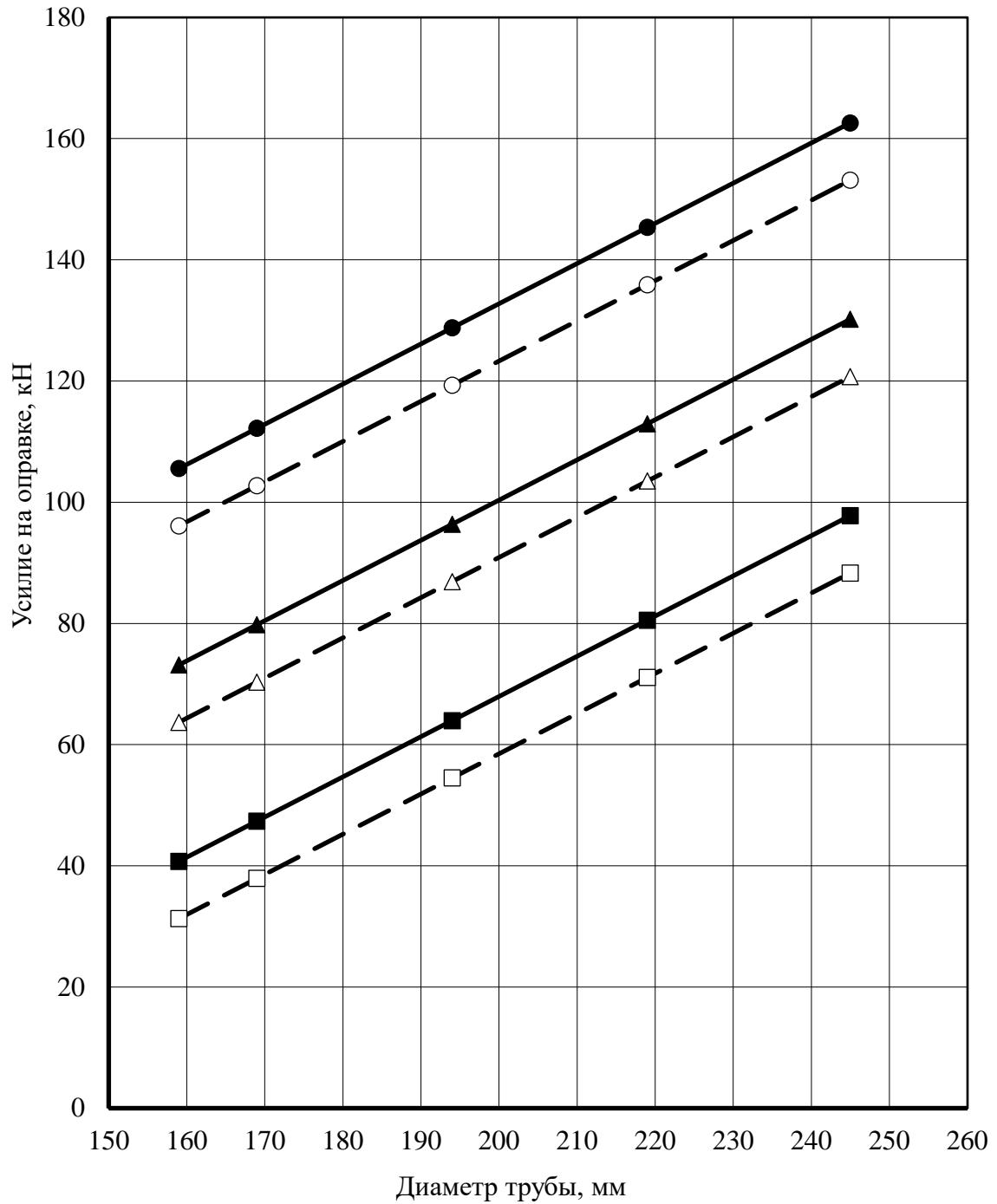
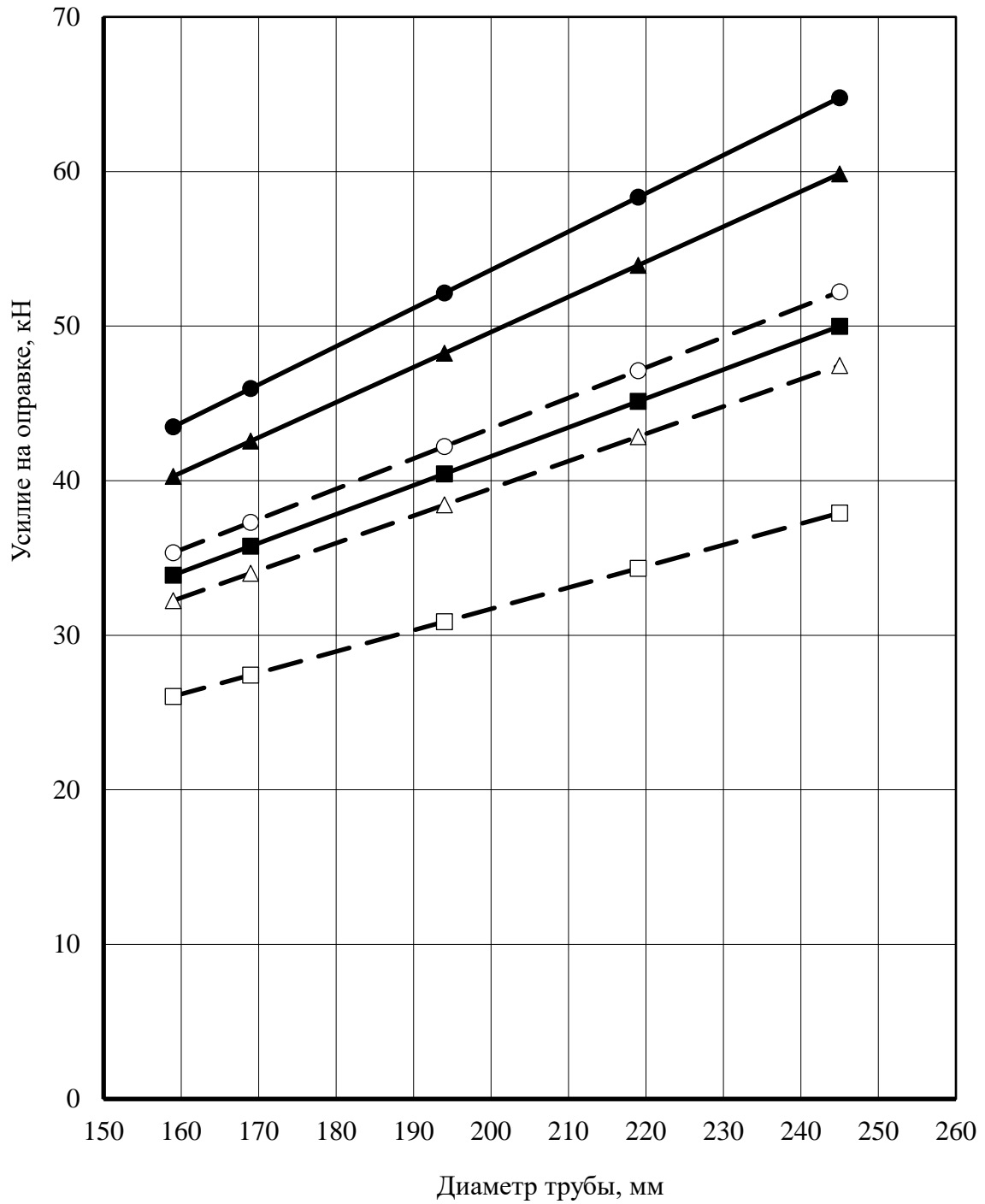


Рисунок 4.27 – Зависимости усилия на оправке обкатного стана при деформации концевых участков в зависимости от входных параметров процесса риллингования труб для МКЭ моделирования при сопротивлении металла деформации 70 МПа



- для $D/S = 14,0$ и $\varepsilon = 0,040$ □ для $D/S = 14,0$ и $\varepsilon = 0,020$
 ▲ для $D/S = 21,0$ и $\varepsilon = 0,040$ △ для $D/S = 21,0$ и $\varepsilon = 0,020$
 ● для $D/S = 28,0$ и $\varepsilon = 0,040$ ○ для $D/S = 28,0$ и $\varepsilon = 0,020$

Рисунок 4.28 – Зависимости усилия на оправке обкатного стана для установившегося режима прокатки в зависимости от степени деформации и относительной тонкостенности трубы для МКЭ моделирования при сопротивлении металла деформации 70 МПа

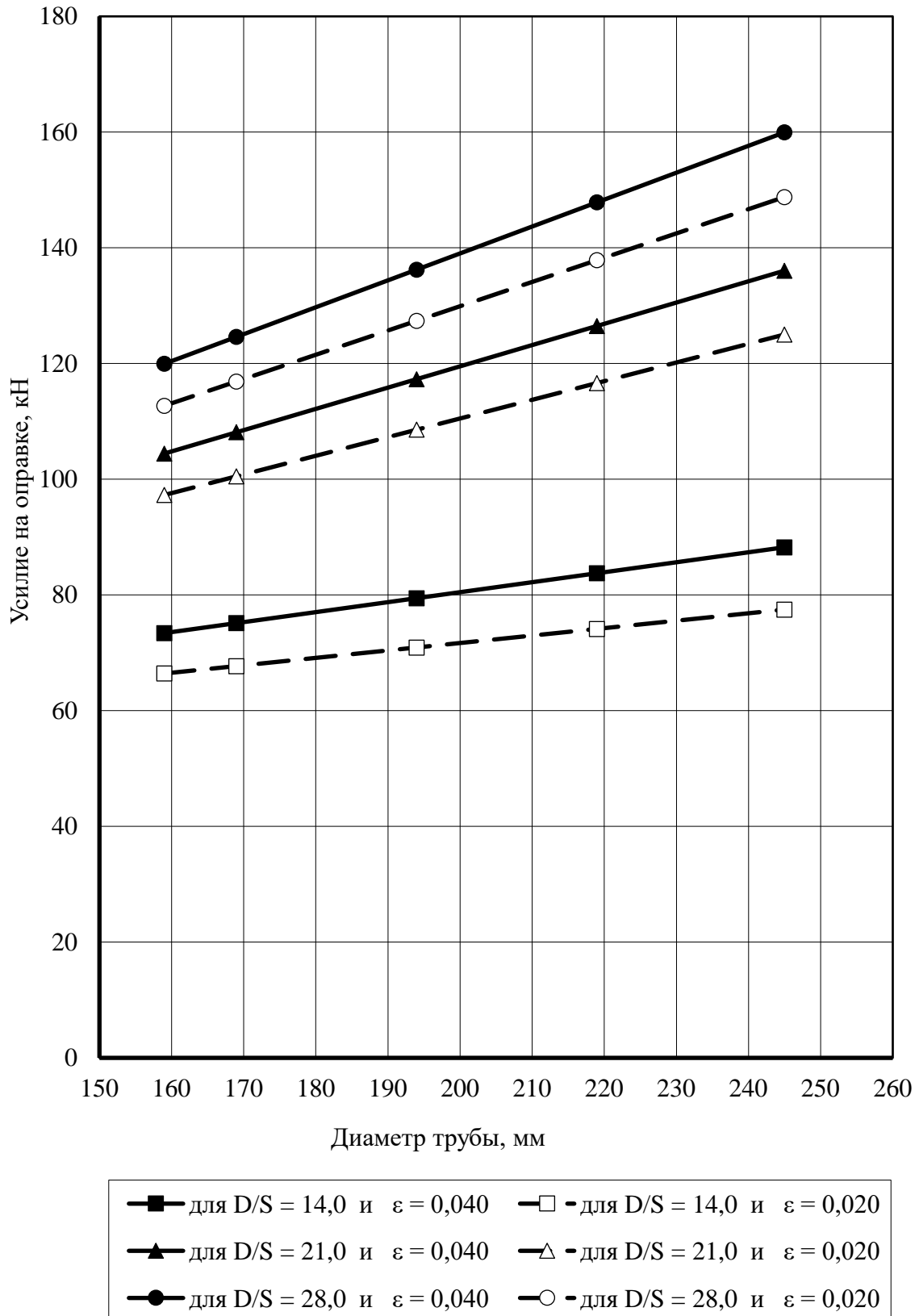


Рисунок 4.29 – Зависимости усилия на оправке обкатного стана при деформации концевых участков в зависимости от входных параметров процесса риллингования труб для МКЭ моделирования при сопротивлении металла деформации 70 МПа

Позиционирование инструмента рабочей клетки, приводящее к снижению раздачи при аналогичном сортаменте до 4 мм, вызывает снижение усилий на 10% при наружном диаметре 159 мм и на 6% при наружном диаметре 245 мм. Для труб с большей толщиной стенки усилие будет меньше (ввиду меньших размеров концевых дефектов). Максимальное снижение имеет место при обкатке трубы номинальным диаметром 159 мм и раздаче 4 мм (относительно толщины стенки 8 мм и раздачи 8 мм) –70%).

По результатам рассмотрения зависимостей, построенных для различных соотношений D/S , представленных на рисунке 4.29, можно сделать вывод о сохранении характера зависимостей. При максимальной степени деформации в рамках рекомендованных для обкатки значений $\varepsilon = 0,04$ для тонкостенных труб $D/S = 28$ в установившемся режиме разница между значениями для диаметров труб 159 мм и 245 мм составляет от 43,5 кН до 64,8 кН 49%. Снижение степени деформации до $\varepsilon = 0,02$ приводит к уменьшению значения для диаметра 159 мм до 35,3 кН (до 20%) и для диаметра 245 мм до 52,2 кН (24%). Низшее положение занимает график, построенный для $D/S = 14$ и $\varepsilon = 0,02$, при котором значения осевых усилий изменяются от 26,1 кН для диаметра 159 мм до 37,9 кН для диаметра 245 мм (рост на 45%).

При раскатке концевых участков расположение графиков, представленных на рисунке 4.30 аналогично тому же, что и для установившейся стадии процесса. Максимальный рост в 33% имеет место для $D/S = 28$ и $\varepsilon = 0,04$ от 120 кН до 160 кН. Снижение параметров до $D/S = 14$ и $\varepsilon = 0,02$ приводит к снижению осевых усилий относительно максимальных значений ($D/S = 28$ и $\varepsilon = 0,04$) при диаметре 159 мм на 45% и при диаметре 245 мм на 52% (рост значений при этом в пределах 17%).

4.4. Выводы по главе 4

1. Выполнен многофакторный эксперимент включающий измерения токовых и скоростных параметров на электродвигателе обкатных станов трубопрокатного агрегата 220 и тензометрические замеры на шпинделях линии привода данных станов с целью проверки правильности теоретического решения задачи по оценке НДС очага деформации при поперечно-винтовой прокатке трубы на конической оправке, а также определения предельного уровня загруженности силовых элементов рабочей клетки и привода данных машин

2. Проведён анализ полученного массива данных для нескольких предельных уровней нагрузки сопоставлением замеров, полученных разными способами учитывающий различный набор марок стали, геометрии труб после автоматического стана, а так же распределения нагрузок между различными элементами клетки. Установлены средние значения нагрузок для прокатываемого сортамента труб, дан рекомендации по возможности использования оборудования для прокатки труб повышенных групп прочности, намечены основные пути усовершенствования оборудования в рамках обкатного стана.

3. На основе данных эксперимента опытно-статистическими методами получены обобщенные зависимости для моментов прокатки от принципиальных параметров, характеризующих физико-механические свойства заготовки при данных условиях деформирования, геометрии трубы и настройки стана. Обнаружена достаточная сходимость между коэффициентами, полученными для экспериментальных измерений и рассчитанными путем КЭ моделирования

4. Используя алгоритм обработки экспериментальных данных выведены зависимости для оставшихся энергосиловых параметров процесса обкатки труб в двухвалковой клетки после автоматического стана ТПА-220 способом поперечно-винтовой прокатки на конической оправке позволяющий в совокупности рекомендовать режимы обкатки труб марок сталей групп повышенной прочности с учетом возможности появления на их заднем конце продольных поперечных складок.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В результате комплексного исследования [27, 95-105] процесса поперечно-винтовой обкатки труб в двухвалковой клетки обкатного стана трубопрокатного агрегата выполнен анализ и определены основные направления совершенствования технологии и оборудования обкатных станов линий производства горячекатанных труб, которые включают определение напряжённо-деформированного состояния металла, оценку энергосиловых параметров и конечного формоизменения труб, расчёт нагруженности силовых элементов рабочей линии стана с целью расширения сортамента производимой продукции за счёт включения материалов групп повышенной прочности и более экономичного профиля.

В процессе комплексного исследования решены следующие научные задачи:

- в ходе экспериментального исследования выявлен новый вид продольных концевых дефектов, образующихся после раскатки гильзы в клетки автоматического стана продольной прокатки на короткой оправке характерный для определенного сортамента тонкостенных труб начиная с $D/S > 25$;
- разработан алгоритм определения напряжённо-деформируемого состояния металла в очаге деформации процесса поперечно-винтовой прокатки трубы на конической оправке на основе КЭ моделирования, который позволяет определить компоненты тензора напряжений, деформаций и скоростей с целью определения энергосиловых параметров процесса для различных стадий формоизменения трубы для оценки кривизны обработанной заготовки и роста нагрузок на прокатный инструмент;
- для различной геометрии продольных дефектов выполнены описания их раскатки в клетки обкатного стана, которые приводят к росту усилий на валке для $D/S = 20$ в 1,7 раза от установившегося режима, для $D/S = 28$ в 1,9 раза и для $D/S = 35$ в 2,3 раза соответственно. В свою очередь это приводит к

всплеску значений моментов прокатки. Выявлено также влияние концевых дефектов на рост осевых усилий на оправку и на проводковый инструмент;

– выполнено экспериментальное исследование по измерению токовых параметров якоря электродвигателя обкатного стана устанавливающее достаточную сходимость между результатами экспериментальных исследований и теоретического изучения очага деформации процесса на основе построения линейных зависимостей моментов прокатки как для установившегося процесса, так и для завершающей стадии попадания концевых дефектов в калибр валков;

– выполнены тензометрические исследования измерения крутящих моментов на шпинделях рабочей линии обкатного стана подтверждающие данные силовых замеров электропривода стана, а также выявившие различный уровень нагружения между прокатным инструментом, в результате предоставившие возможность научно обоснованной настройки клетки автоматического стана;

– выполнена математическая обработка теоретических и экспериментальных данных позволившая рассчитывать уровень нагружения рабочей линии обкатного стана для труб групп повышенной прочности в рамках установленного диапазона диаметров труб от 159 мм до 245 мм за счёт учёта физико-механических свойств марок сталей, профиля трубы и степени деформации трубы при обкатке для всех стадий процесса.,

В рамках дальнейшей разработки темы, основные положения диссертации и методики расчёта рекомендуется использовать для проектирования новых и совершенствования действующих технологических режимов прокатки бесшовных труб на автоматических станах.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Емельяненко П.Т. Теория кривой и пилигримовой прокатки / П.Т. Емельяненко. – М.: Государственное научно-техническое издательство литературы по черной и цветной металлургии, 1949. – 491 с.
2. Тетерин П.К. Теория поперечной и винтовой прокатки / П.К. Тетерин. – М.: Металлургия, 1983. – 270 с.
3. Чекмарев А.П. Интенсификация поперечно-винтовой прокатки / А.П. Чекмарев, Ю.М. Матвеев, В.Н. Выдрин, Я.С. Финкельштейн. – М.: Металлургия, 1970. – 184 с.
4. Овчинников Д.В. Развитие и внедрение процесса обжатия непрерывнолитой заготовки на трехвалковом обжимном стане винтовой прокатки / Д.В. Овчинников, М.В. Ерпалов, А.А. Богатов // Труды VIII Конгресса прокатчиков, г. Магнитогорск, 2010 г. – Магнитогорск, 2010. – С 294-300.
5. Овчинников Д.В. Совершенствование технологии обжатия непрерывнолитой заготовки на трехвалковом обжимном стане винтовой прокатки / 147 Д.В. Овчинников, М.В. Ерпалов, А.А. Богатов // Труды XVIII международной научно-технической конференции Трубы 2010. – Челябинск, 2010.
6. Ваткин Я.Л. Улучшение качества труб при прошивке заготовок с уменьшенным коэффициентом вытяжки / Я.Л. Ваткин, Г.А. Бибик, В.М. Друян // Сб. Обработка металлов давлением LV. – М.: Металлургия, 1970. – С. 164-170.
7. Прошивка в косовалковых станах / А.П. Чекмарев, Я.Л. Ваткин, М.И. Ханин и др.; ред. В.А. Рымов – М.: Металлургия, 1967. – 240 с.
8. Марченко К.Л. Опыт использования непрерывнолитой заготовки из углеродистой стали при производстве бесшовных труб / К.Л. Марченко, В.Ю. Кузнецов, М.М. Фадеев и др. // Сталь. – 2003. – № 8. С. 53-54.

9. Марченко К.Л. Прошивка непрерывнолитой заготовки при повышенном обжатии / А.Л. Марченко, К.А. Поляков, Б.А. Романцев и др. // Прокатное производство. – 2005. – № 2.
10. Марченко К.Л. Интенсификация процесса винтовой прошивки непрерывнолитых заготовок с целью повышения качества труб: автореферат дис. ... канд. тех. наук / К.Л. Марченко. – Москва, 2007.
11. Выдрин А.В. Компьютерное моделирование процесса прошивки в стане винтовой прокатки с бочковидными валками / А.В. Выдрин, А.В. Король, В.В. Широков // Вестник ЮУрГУ. Серия “Металлургия”. – Челябинск, 2015. – С.
12. Голубчик Р.М. Повышение эффективности процесса прошивки заготовок с учетом исходной пластичности / Р.М. Голубчик, Д.В. Меркулов, С.В. Титова // Сталь. – 2001. – №1. С. 55-59.
13. Голубчик Р.М. Новая методика расчета параметров настройки прошивных косовалковых станков / Р.М. Голубчик, Е.Д. Клемперт, С.В. Титова и др. // Производство проката. – 2001. – №8. – С. 20-23.
14. Голубчик Р.М. Оценка режимов прошивки заготовок с учетом циклического формоизменения при винтовой прокатке / Р.М. Голубчик, Е.Д. Клемперт, Д.В. Меркулов // Металлы. – 2000. – №5. – С. 60-62.
15. Голубчик Р.М. Режимы прошивки заготовок / Р.М. Голубчик, Д.В. Меркулов // Теория и практика металлургии. – 2006. – №6. – С. 105-111.
16. Голубчик Р.М. Определение системы использования ресурса пластических свойств при горячей обработке металлов давлением / Р.М. Голубчик // Металлы. – 2009. – №1. – С. 21-24.
17. Голубчик Р.М. Расчёт коэффициентов осевой и тангенциальной скоростей по длине очага деформации при винтовой прокатке / Р.М. Голубчик, Д.В. Меркулов, М.В. Чепурин // Черная металлургия. – 2011. – №1. С. 54-57.
18. ГОСТ 34636-2020. Заготовка трубная. Общие технические условия: межгосударственный стандарт: дата введения 2020–10–01. – Москва: Стандартинформ, 2020. – 24 с.

19. Данченко В.Н. Технология трубного производства / В.Н. Данченко, А.П. Коликов, Б.А. Романцев, С.В. Самусев. М.: Интермет Инжиниринг, 2002. 640 с.
20. Полухин П.И., Федосеев Н.М., Королев А.А., Матвеев Ю.М. Прокатное производство. Учебник для вузов. 3-е изд. / П.И. Полухин [и др.]. – Металлургия, 1982, 696 с.
21. Технология и оборудование трубного производства / В.Я. Осадчий, А.С. Вавилин, В.Г. Зимовец, А.П. Коликов. М.: Интермет Инжиниринг, 2001. 608 с.
22. Целиков А.И. Теория расчёта усилий в прокатных станах / А.И. Целиков. – М.: Metallurgizdat, 1962. – 494 с.
23. Кнорозов Б.В. Технология металлов / Кнорозов Б. В., Усова Л. Ф., Третьяков А. В., Китаев Я.А., Филькин В.М., Шевченко А.А., Усов Г.А.: М.: Металлургия, 1987. – 800 с.
24. ГОСТ 1050-2013. Металлопродукция из нелегированных конструкционных качественных и специальных сталей: межгосударственный стандарт: дата введения межгосударственный стандарт: дата введения 2020–10–01. – Москва: Стандартинформ, 2014. – 32 с.
25. Марочник сталей и сплавов. 2-е изд. доп. и испр. / А.С. Зубченко, М.М. Колосков, Ю.В. Каширский и др. Под общей редакцией А.С. Зубченко – М.: Машиностроение, 2003. 784 с.
26. Осадчий В.Я., Коликов А.П. Производство и качество стальных труб: учебное пособие для вузов / под ред. В.Я. Осадчего. М.: Издательство МГУПИ, 2012. – 370 с.
27. Fedulov A.A. Exclusion of the pipe rear end defects in the process of the PRP 220 rolling using the FE modeling / A.A. Fedulov, S.Yu. Belyaev, V.A. Morgunov, M.Yu. Bulganina, R.K. Khasenov // AIP Conference Proceedings. – 2021. – V. 2402. – С. 070010.

28. Горячая прокатка и прессование труб / Ф.А. Данилов, А.З. Глейберг и др. – М.: Metallurgy, 1972. – 576 с.
29. Тетерин П.К. Теория поперечно-винтовой прокатки. – М.: Metallurgy, 1971. – 368 с.
30. Производство стальных труб / Друян В.М., Крупман Ю.Г., Ляховецкий Л.С., Грубер И., Кёвеш Ф. – Под ред. Друяна В.М. Учебник для техникумов. – М.: Metallurgy, 1989. – 400 с.
31. Горячая прокатка и прессование труб / Ф.А. Данилов, А.З. Глейберг и др. – М.: Metallurgy, 1972. – 576 с.
32. Производство труб: учебное пособие / Ю.Ф. Шекавин, А.П. Коликов, Ю.Н. Райков; под ред. Ю.Ф. Шевакина. – М.: Интернет Инжиниринг, 2005. – 568 с.
33. Король А.В. Применение энергостатического метода определения усилий и моментов, действующих на инструмент при прошивке на двухвалковых станах поперечно-винтовой прокатки с приводными направляющими дисками / А.В. Король, А.В. Мунтин, Л.М. Кавицян // Вестник Южно-Уральского государственного университета. Серия: металлургия. – 2020. – № 1. – С. 18–26.
34. Карпов С.М. Связь механических свойств металла с деформационными условиями прошивки заготовок в гильзы на прошивном стане винтовой прокатки / С.М. Карпов, А.Г. Колесников, А.Н. Никулин // Проблемы черной металлургии и материаловедения. – 2019 – № 1. – С. 5–20.
35. Романцев Б.А. Экспериментальные исследования результирующего скручивания металла при прошивке в двухвалковом стане винтовой прокатки / Б.А. Романцев, А.В. Гончарук, А.С. Алещенко, М.В. Красильщиков // Известия высших учебных заведений. Черная металлургия. – 2012. – № 11. – С. 38–40.
36. Курятников А.В. Исследование процесса обкатки (риллингования) труб на трехвалковом стане винтовой прокатки ТПА-140 ОАО «СинТЗ» / А.В. Курятников, А.В. Король, А.А. Корсаков // Вестник Южно-Уральского

- государственного университета. Серия: металлургия. – 2013. – Том 13.– № 1. – С. 160–164.
37. Пат. 2556164 Рос. Федерация, МПК С 01 В21В 19/16. Способ получения тонкостенных труб на трубопрокатных агрегатах с трехвалковым раскатным станом: № 2013156773/02 : заявл. 20.12.2013: опубл. 10.07.2015 / Харитонов Е.А., Романенко В.П., Будников А.С.; заявитель и патентообладатель Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Национальный исследовательский технологический университет «МИСиС». – 11 с.
38. Tartakovskii, B.I. Production of thin-walled pipe on a system with a three-roller mill / B.I Tartakovskii // *Steel in Translation*. – 2009. –V 39(11). – С. 1024-1026.
39. Yang, X. Investigation on process of a 3-roll sizing mill / X. Yang // *Kang T'ieh / Iron and Steel (Peking)*. – 2002. – V. 37(5). – С. 28-30.
40. Kharitonov E. A. Sleeve deformation in a three-roller screw-rolling mill / E.A. Kharitonov, V.P. Romanenko, A.S. Budnikov // *Steel in Translation*. – 2016. – V 46. – С. 180–185.
41. Rotenberg Zh. Ya. Modernization of Helical Rolling Technology in a Multi-Roll Mill / Zh. Ya. Rotenberg, A. S. Budnikov // *Steel in Translation*. – 2022–V 52. – С. 11–16.
42. Nikulin, A.N. Flow of metal during piercing at screw rolling mill / A.N. Nikulin, // *Metallurg*. – 2004–V 9. – С. 42–46.
43. Toporov, V.A. Determination of geometric relationships of a deformation zone during the helical piercing of billets / V.A. Toporov, O.A.Panasenko, A.A. Bogatov, D.S. Nukhov // *Chernye Metally*. – 2019. – V 4. – С. 27–31.
44. Романцев Б.А. Компьютерное моделирование прошивки заготовок в четырехвалковом стане винтовой прокатки / Б.А. Романцев, М.М. Скрипаленко, Чан Ба Хюи, М.Н. Скрипаленко, Ю.А. Гладков, А.А. Гартвиг // *Металлург*. – 2017. – № 9. – С. 19–24.

45. Максимов В.М. Моделирование процессов прошивки в стане винтовой прокатки с использованием QFORM / В.М. Максимов, О.С. Хлыбов // Кузнечно-штамповочное производство. Обработка материалов давлением. – 2016. – № 12. – С. 17–22.
46. Король А.В. Компьютерное моделирование процесса прошивки в стане винтовой прокатки с бочковидными валками / А.В. Король, В.А. Выдрин, В.В. Широков // Вестник Южно-Уральского государственного университета. Серия: металлургия. – 2015. – № 2. – С. 68–74.
47. Богатов А.А. Разработка математической модели и исследование процессов винтовой прокатки и прошивки заготовок / А.А. Богатов, Д.В. Овчинников, С.В. Липняков, Д.А. Павлов, Д.Ш. Нухов, М.В. Ерпалов // Производство проката. – 2013. – № 7. – С. 28–33.
48. Колмогоров В.Л. Механика обработки металлов давлением: Учебник для вузов. 2-е изд. перераб. и доп. Екатеринбург: изд. УГТУ-УПИ, 2001. – 836 с.
49. Воронцов А.Л. Теория и расчёты процессов обработки металлов давлением: учеб. пособие: в 2 т. / А.Л. Воронцов. – М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2014.
50. Унксов Е.П. Инженерная теория пластичности / Е.П. Унксов. – М.: Машгиз, 1959. – 328 с.
51. Теория пластических деформаций металлов / Е.П. Унксов [и др.]. – М.: Машиностроение, 1983. – 598 с.
52. Целиков А.И. Теория прокатки: Справочник / А.И. Целиков [и др.]. – М.: Металлургия, 1982. – 335 с.
53. Целиков А.И. Теория расчёта усилий в прокатных станах / А.И. Целиков. – М.: Metallurgizdat, 1962. – 494 с.
54. Губкин С.И. Пластическая деформация металлов: в 3-х томах / С.И. Губкин. – М.: Metallurgizdat, 1960-61. – Т. 1-3.
55. Альшевский Л.Е. Тяговые усилия при холодном волочении труб / Л.Е. Альшевский. – М.: Metallurgizdat, 1952. – 134 с.

56. Томленов А.Д. Теория пластического деформирования металлов / А.Д. Томленов. – М.: Металлургия, 1972. – 408 с.
57. Томленов А.Д. Механика процессов обработки металлов давлением/ А.Д. Томленов. – М.: МАШГИЗ, 1963. – 236 с.
58. Соколовский В.В. Теория пластичности / В.В. Соколовский. – М.: Высшая школа, 1969. – 608 с.
59. Хилл Р. Математическая теория пластичности / Р. Хилл; пер. с англ. – М.: ГИТТЛ, 1956. – 407 с.
60. Смирнов-Аляев Г.А. Сопротивление материалов пластическим деформациям / Г.А. Смирнов-Аляев. – М.: Машгиз, 1961. – 296 с.
61. Сторожев М.В. Теория обработки металлов давлением / М.В. Сторожев, Е.А. Попов. – М.: Машиностроение, 1971. – 424 с.
62. Перлин И.Л. К выводу формулы Зибеля при осаживании круглого цилиндра / И.Л. Перлин // Вестник машиностроения. – 1958. – No2. – С. 44-45.
63. Выдрин В.Н. Процесс непрерывной прокатки / В.Н. Выдрин, А.С. Федосиенко, В.М. Крайнов. – М.: Металлургия, 1970. – 286 с.
64. Выдрин В.Н. Теоретические основы ассиметричной прокатки в гладких валках / В.Н. Выдрин, В.Я. Тумаркин // Теория и технология прокатки: сб. ст. – Челябинск: ЧПИ, 1968. – С. 47-57.
65. Теория обработки металлов давлением: Вариационные методы расчета усилий и деформаций / И. Я. Тарновский [и др.]; под ред. И. Я. Тарновского. – М.: Metallurgizdat, 1963. – 672 с.
66. Колмогоров В.Л. Напряжения. Деформации. Разрушение / В.Л. Колмогоров. – М.: Металлургия, 1970. – 230 с.
67. Колмогоров В.Л. Механика обработки металлов давлением / В.Л. Колмогоров. – М.: Металлургия, 1986. – 688 с.
68. Пластическое формоизменение металлов / Г.Я. Гун [и др.]. – М.: Металлургия, 1983. – 416 с.

69. Гун Г.Я. Математическое моделирование процессов обработки металлов давлением / Г.Я. Гун. – М.: Metallurgy, 1983. – 352 с.
70. Зенкевич О. Конечные элементы и аппроксимация / О. Зенкевич, К. Морган; пер. с англ. Б.И. Квасова; под ред. Н.С. Бахвалова. – М.: Мир, 1986.– 318 с.
71. Zienkiewicz O. Finite Element Method: fifth edition / O. Zienkiewicz, R. Taylor. – Butterworth and Heinemann, 2000. – V. 1-3.
72. Kobayashi S. Metal forming and the finite-element method / S. Kobayashi, S.-I. Oh, T. Altan. – Oxford University press, Inc., 1989. – 377 p.
73. Галлагер Р. Метод конечных элементов. Основы / Р. Галлагер; пер. с англ. В.Н. Картвелишвили; под ред. Н.В. Баничука. – М.: Мир, 1984. – 428 с.
74. Деклу Ж. Метод конечных элементов / Ж. Деклу. – М.: Мир, 1976. – 96 с.
75. Норри Д. Введение в метод конечных элементов / Д. Норри, Ж. де Фриз. – М.: Мир, 1981. – 304 с.
76. Шайдуров Владимир Викторович. Многосеточные методы конечных элементов / В.В. Шайдуров. – Москва: Наука, 1989. – 288 с.
77. Kobayashi S. Metal forming and the finite-element method/S. Kobayashi, S.-I. Oh, T. Altan. – Oxford University press, Inc., 1989. – 377 p.
78. Теория обработки металлов давлением: учебник для вузов / В.А. Голенков, С.П. Яковлев, С.А. Головин, С.С. Яковлев, В.Д. Кухарь; под ред. В.А. Голенкова, С.П. Яковлева. – М.: Машиностроение, 2009. – 442 с.
79. Гун Г. Я. Теоретические основы обработки металлов давлением. Теория пластичности. Учебник для вузов. М. Metallurgy 1980. – 456 с.
80. Finite Element Method: fifth edition/ O. Zienkiewicz., R. Taylor. – Buttworth and Heinemann, 2000. – V.1-3.
81. DEFORM-3D Modeling in Continuous Extrusion of Copper Busbars for Installation Conform with the Pre-Chamber Matrix Yury V. Gorohov, Sergey V. Belyaev, Igor V. Mochalin, Igor V. Uskov, Ivan Yu. Gubanov, Tatiana Yu. Gorokhova and Pavel A. Hramtsov // Journal of Siberian Federal University. Engineering & Technologies, 2016, 9(6), 821-829

82. В.С. Паршин, А.П. Карамышев, И.И. Некрасов, А.И. Пугин, А.А. Федулов. Практическое руководство к программному комплексу DEFORM-3D. Учебное пособие. – Екатеринбург: УрФУ, 2010. – 266 с.
83. Федулов А.А. Моделирование очага деформации с целью разработки процесса и определения параметров прокатки плоских ребристых заготовок: спец. 05.02.09 «Технологии и машины обработки давлением»: дис. ... канд. техн. наук / А.А. Федулов; Урал. федер. ун-т им. первого Президента России Б. Н. Ельцина. – Екатеринбург, 2013. – 153 с.
84. Раскатов Е.Ю. Совершенствование технологии и оборудования пилигримовых станов для прокатки бесшовных труб: спец. 05.02.09 «Технологии и машины обработки давлением»: дис. ... д-ра. техн. наук / Е. Ю. Раскатов; Урал. федер. ун-т им. первого Президента России Б. Н. Ельцина. – Екатеринбург, 2012. – 376 с.
85. Поршнева С.В., Беленкова И.В. Численные методы на базе Mathcad. – СПб.: БХВ-Петербург, 2005 – 464 с.
86. ТИ 159-ТР.ТБ-253-09. Производство горячекатаных труб на трубопрокатной установке 220 в цехе №1. Технологическая инструкция с изменениями 1–9. – Первоуральск: ОАО «ПНТЗ», 2009 – 96 с.
87. Машиностроение. Энциклопедия / Ред. совет: К.В. Фролов (пред.) и др. – М.: Машиностроение. Электроприводы. Т. 4-2. Кн. 1 / Л.Б. Масандилов, 2012 – 520 с.
88. Фотиев М.М. Электропривод и электрооборудование металлургических цехов: [Учеб. для металлург. спец. вузов] / М. М. Фотиев. - 3-е изд., перераб. И доп. - Москва: Металлургия, 1990 – 349 с.
89. Восканьянц А.А., Иванов А.В. Моделирование процесса холодной поперечно-винтовой прокатки методом конечных элементов // Производство проката. – 2004. – №11. – С.10 – 17.
90. Восканьянц А.А., Иванов А.В. Исследование процесса холодной поперечно-винтовой прокатки на трехмерной конечно-элементной модели // Сборник трудов Всероссийской научно-технической конференции,

- посвященной 100-летию со дня рождения академика А.И. Целикова (Москва, 14-15 апреля 2004 г.). / Под. ред. А.А. Восканьянца. – М.: МГТУ им. Н.Э.Баумана, 2004. – С. 332–340.
91. Панов Е.И., Осадчий В.Я. Особенности технологического процесса производства прутков и бесшовных труб методом поперечно-винтовой прокатки из труднодеформируемых заэвтектических силуминовых сплавов 01390 и 01391 // Сборник трудов Всероссийской научно-технической конференции, посвященной 100-летию со дня рождения академика А.И. Целикова (Москва, 14-15 апреля 2004 г.). / Под. ред. А.А. Восканьянца. – М.: МГТУ им. Н.Э.Баумана, 2004. – С. 83–94.
92. Панов Е.И., Осадчий В.Я. Особенности технологического процесса производства прутков и бесшовных труб методом поперечно-винтовой прокатки из труднодеформируемых заэвтектических силуминовых сплавов 01390 и 01391 // Сборник трудов Всероссийской научно-технической конференции, посвященной 100-летию со дня рождения академика А.И. Целикова (Москва, 14-15 апреля 2004 г.). / Под. ред. А.А. Восканьянца. – М.: МГТУ им. Н.Э.Баумана, 2004. – С. 83-94.
93. Кобзарь А. И. Прикладная математическая статистика. Для инженеров и научных работников. - М.: ФИЗМАТЛИТ, 2006. - 816 с.
94. Основы научных исследований и моделирования металлургических машин: [учеб. пособие] / Е. Ю. Раскатов, В. А. Спиридонов; [науч. ред. В. С. Паршин] ; М-во образования и науки Рос. Федерации, Урал. федер. ун-т. – Екатеринбург: Изд-во Урал. ун-та, 2015. – 468 с.
95. Belyaev S.Yu. Integrated study of load distribution between the working and support rollers of sheet straightening machines with one row of support rollers / S.Yu. Belyaev, A.A. Fedulov, E.Yu. Raskatov, M.Y. Bulganina, A.S. Alexandrova // AIP Conference Proceedings. – 2022. – V. 2456. – С. 020009.
96. Belyaev S.Yu. Studying the process of pipe reeling based on the monitoring of the drive's loading parameters / S.Yu. Belyaev, A.A. Fedulov, M.Yu. Bulganina,

- V.I. Kuznetsov // *Materials Today: Proceedings.* – 2021. – V. 38(4), – P. 1813-1816.
97. Belyaev S.Yu. Experimental Study of Features of Thin-Walled Pipes Sizing in the Line of a Pipe Rolling Plant with an Automatic Mill / S.Yu. Belyaev, A.A. Fedulov, Yu.M. Chernyshev, V.I. Kuznetsov, M.Yu. Bulganina // *MATEC Web of Conferences.* – 2021. – V. 346, – C. 01032.
98. Chumakova L.A. The methodology of a part lifetime calculation / L.A. Chumakova, M.Y. Bulganina, A.S. Alexandrova // *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering.* – 2020. – V. 862. – C. 032037.
99. Chechulin Yu.B. Theoretical Research on the Pipe Rolling Process in Order to Determine the Deformation of the Pipe Billet and the Load on the Rolling Tool / Yu.B. Chechulin, A.A. Fedulov, A.I. Dronov, V.A. Morgunov, M.Yu. Bulganina // *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering.* – 2020. – V. 718, – C. 012004.
100. Belyaev S.Yu. Experimental Research of the Hot-Rolled Pipe Wall Sizing Process at the Reeling Mill of Pipe-Rolling Plant-140 in Conditions of Product Mix Extension / S.Yu. Belyaev, Yu.B. Chechulin, A.A. Fedulov, M.Yu. Bulganina // *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering.* – 2020. – V. 718, – C. 012002.
101. Belyaev S.Yu. Research of Load Distribution between Working and Backup Rolls of Sheet Levelling Machine with Regard to Gaps and Heat Strain / S.Yu. Belyaev, Yu.B. Chechulin, A.A. Fedulov, M.Yu. Bulganina // *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering.* – 2020. – V. 718, – C. 012003.
102. Шевелев М.М. Развитие технологии производства сварных труб из нержавеющей сталей для применения в нефтегазовой и атомной промышленности / М.М. Шевелев, И.О. Мочалова, А.В. Михалев, М.Ю. Булганина // *Газовая промышленность.* – 2020. – № 11. – С. 26–27.
103. Шевелев М.М. Моделирование технологии индукционной сварки нержавеющей сталей для производства электросварных труб с повышенными эксплуатационными показателями / М.М. Шевелев, А.В.

- Михалев, И.О. Мочалова, Е.Ю. Раскатов, М.Г. Близник, М.Ю. Булганина // Территория «НЕФТЕГАЗ». – 2020. – № 11-12. – С. 20-22.
104. Беляев С.Ю. Разработка методики рисков отказов узлов и деталей прокатного оборудования / С.Ю. Беляев, А.А. Федулов, Е.Ю. Раскатов, М.Ю. Булганина // Современные Материалы и Передовые Производственные Технологии (СМПТТ-2021). Сборник тезисов Международной научной конференции. Санкт-Петербург. – 2021. – С. 152-154.
105. Раскатов Е.Ю. Теоретические и экспериментальные исследования износа инструмента с целью улучшения геометрии бойков в радиально-ковочной машине / Е.Ю. Раскатов, С. Дарки, М.Ю. Булганина // Современные Материалы и Передовые Производственные Технологии (СМПТТ-2021). Сборник тезисов Международной научной конференции. Санкт-Петербург. – 2021. – С. 87-88.